

---

# **DIPLOMARBEIT**

---

Herr  
**Daniel Hoppe**

**Entwicklung und Aufbau eines  
Messeausstellers für  
Lichtmodulatoren**

2010



---

# **DIPLOMARBEIT**

---

## **Entwicklung und Aufbau eines Messeausstellers für Lichtmodulatoren**

Autor:

**Daniel Hoppe**

Studiengang:

Physikalische Technik

Seminargruppe:

PT06wP1

Erstprüfer:

Prof. Dr. Bernhard Steiger

Zweitprüfer:

Dr. Steffen Sinning

Mittweida, Oktober 2010





---

## **Bibliografische Angaben**

Hoppe, Daniel: Entwicklung und Aufbau eines Messeausstellers für Lichtmodulatoren, 65 Seiten, 40 Abbildungen, 14 Tabellen, Hochschule Mittweida (FH), Fakultät Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik

Diplomarbeit, 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Satz:  $\text{\LaTeX}$

## **Referat**

Ziel der Diplomarbeit ist es, einen Messeanforderungen genügenden Aussteller für einen reflektierenden Lichtmodulator zu entwickeln und aufzubauen. Die Grundlagen zum verwendeten Lichtmodulator und das Konzept des Ausstellers werden beschrieben. Nachfolgend wird die Umsetzung der Idee behandelt und die erzielten Ergebnisse dargestellt. Hauptaspekte der Arbeit sind Optik, Elektronik, mechanischer Aufbau und Software des Messeausstellers.



# I. Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Vorwort</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Prinzip des Ausstellers . . . . .	3
2.2 Komponenten des Ausstellers . . . . .	4
2.3 Forderungen an den Aussteller . . . . .	5
2.4 Grundlagen Flächenlichtmodulator . . . . .	7
2.5 Bauelement Zeile256 . . . . .	13
<b>3 Optik</b>	<b>15</b>
3.1 Laser . . . . .	15
3.2 Strahlformungsoptik . . . . .	16
3.3 Scan-Einheiten . . . . .	17
3.4 Abbildungsoptik . . . . .	18
<b>4 Elektronik</b>	<b>21</b>
4.1 Pixelansteuerung . . . . .	21
4.2 Steuerungsschaltung . . . . .	25
<b>5 Lasersicherheit</b>	<b>39</b>
<b>6 Software und Bildgenerierung mit LabVIEW</b>	<b>47</b>
6.1 Generierung der Bildinformationen . . . . .	47
6.2 Umsortierung der Bildinformationen . . . . .	50
6.3 Ansteuerung des Boards . . . . .	54
<b>7 Gehäuse</b>	<b>57</b>
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>61</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>63</b>



## II. Abbildungsverzeichnis

2.1	Flächige Projektion durch den Scan eines eindimensionalen Streifens . . . . .	3
2.2	Blockschaltbild der Hauptkomponenten des Ausstellers . . . . .	4
2.3	Schematische Darstellung eines Einzelspiegels (3D) . . . . .	7
2.4	REM-Aufnahme von Spiegeln und Elektroden . . . . .	8
2.5	Auslenkung eines Einzelspiegels . . . . .	8
2.6	Abhängigkeit der Auslenkung $d$ von der Spannung $U_A$ . . . . .	9
2.7	Abbildungsprinzip für einen phasenmodulierenden Lichtmodulator . . . . .	10
2.8	Gitteranordnung der Einzelspiegel . . . . .	11
2.9	Auslenkung und Intensität der nullten Ordnung [2] . . . . .	12
3.1	Schematische Darstellung des optischen Aufbaus . . . . .	15
3.2	Hell-Dunkel-Übergang bei verschiedenen Streifenbreiten . . . . .	19
4.1	Schema der Umsortierung der Pixelzuordnung . . . . .	22
4.2	Platinen für die Umverdrahtung . . . . .	23
4.3	Schaltung Scanner-Steuerung . . . . .	26
4.4	Grundsaltung eines OPV als nichtinvertierender Verstärker [9] . . . . .	29
4.5	Positionssignal des Scanners und Triggersignal . . . . .	30
4.6	Übersicht Scanzzyklus . . . . .	31
4.7	Timingablauf . . . . .	32
4.8	Beschaltung des Timer 555 für monostabilen Betrieb . . . . .	33
4.9	Schaltung Timingteil . . . . .	33
4.10	Signalverlauf Boardsynchronisation . . . . .	34
4.11	Signalverlauf Lasersynchronisation . . . . .	35
4.12	Übersicht Scannersteuerung und Timing . . . . .	36
4.13	Schaltung Taktgenerator . . . . .	37
5.1	Blockschaltbild der logischen Verknüpfungen . . . . .	42
5.2	Schematischer Signalverlauf bei Eintritt einer Störung . . . . .	43
5.3	Logikteil der Steuerungsschaltung . . . . .	43
6.1	Erstellung des Uhrzeit-Arrays . . . . .	48

6.2	Struktogramm zur Erstellung des Uhrzeit-Arrays . . . . .	49
6.3	Screenshot des LabVIEW-Programms zur Uhrzeitgenerierung . . . . .	49
6.4	Schema der Codierung des Arrays für das Steuerungsboard . . . . .	50
6.5	Umsortierung des Arrays . . . . .	51
6.6	Struktogramm zur Umsortierung eines Uhrzeit-Arrays nach der Board-Codierung . .	52
6.7	Screenshot des LabVIEW-Programms zur Umsortierung der Uhrzeit . . . . .	54
6.8	Ablauf der Steuerung des Boards . . . . .	55
6.9	LabVIEW-Oberfläche zur Steuerung des Ausstellers . . . . .	55
7.1	Ebenenaufbau des Ausstellers . . . . .	58
7.2	Signallaufplan des Ausstellers . . . . .	59
7.3	Gehäusedesign des Messeausstellers . . . . .	60
8.1	Projektion einer Uhrzeit . . . . .	61

---

## III. Tabellenverzeichnis

4.1 Umsortierung der Pixelzuordnung . . . . .	22
4.2 Belegung Flachbandkabel . . . . .	24
4.3 JP1 Signalform . . . . .	27
4.4 JP2 Einstellungen max1 . . . . .	28
4.5 Potenziometer zur Einstellung des Scanverlaufs . . . . .	29
4.6 Pin2 Scanner + Clock . . . . .	31
4.7 Potenziometer zur Einstellung des Timings . . . . .	35
4.8 Pin1 Timer 555 . . . . .	36
5.1 Signale der Logikschaltung . . . . .	40
5.2 Schalttafel der Logikschaltung . . . . .	41
5.3 Verwendete Logikbauelemente . . . . .	42
5.4 Pin3 Fehlereingänge . . . . .	44
5.5 Pin3 Synchronisation + Sicherheit . . . . .	45
6.1 Zuordnung der Arraywerte zur Intensität in der Projektion . . . . .	49





## **IV. Vorwort**

Die vorliegende Diplomarbeit wurde in der Zeit von März 2010 bis September 2010 in der Arbeitsgruppe „SR - SLM Research“ am Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS) in Dresden angefertigt.

Ich möchte mich ausdrücklich bei all denen bedanken, die an der Entstehung dieser Arbeit mitgewirkt haben, insbesondere bei Frau Dr. U. Dauderstädt, Herrn Dr. S. Sinning und Prof. Dr. rer. nat. B. Steiger sowie den Mitarbeitern des Geschäftsfeldes SLM des IPMS für die Unterstützung und die Beantwortung der aufgetretenen Fragen während der Erstellung meiner Diplomarbeit.



# 1 Einleitung

Für einen neuartigen, aktuell am IPMS entwickelten Lichtmodulator soll ein Messeaussteller entwickelt und aufgebaut werden. Messeaussteller stellen als Schnittstelle zu potenziellen Kunden die Basis zur Bekanntmachung neuer Entwicklungen dar und sind daher unverzichtbarer Bestandteil für Kundenakquisition und Promotionaufgaben auf Messen und am IPMS. Bei den zur Anwendung kommenden Lichtmodulatoren handelt es sich um Mikro-Opto-Elektro-Mechanische Systeme (MOEMS). Die Bauelemente sind aus Mikrospiegeln aufgebaut, welche in Matrizen aus bis zu über einer Million Einzelspiegeln angeordnet sind.

Eine allgemeine, gut abgrenzende und zugleich verständliche Definition für einen Flächenlichtmodulator (kurz: SLM<sup>1</sup>) liefert M. C. Crandall [1]:

„Ein Flächenlichtmodulator ist ein in Echtzeit programmierbares Bauteil, das die Amplitude, die Phase oder den Polarisationszustand einer einfallenden Wellenfront in Abhängigkeit des Ortes mittels elektrischer oder optischer Steuersignale verändern kann.“

Derzeitige Anwendungsgebiete für Lichtmodulatoren sind u. a.:

- DLP<sup>2</sup>
- Adaptive Optiken zur Wellenfrontkorrektur
- Mikrolithographie zur Maskenbelichtung
- Wafer-Direktbelichtung
- PCB<sup>3</sup>-Belichtung
- CTP<sup>4</sup>

Die Mikrospiegel-basierten Flächenlichtmodulatoren (kurz: SLM) können zur räumlich hochauflösenden Modulation von Amplitude und Phase elektromagnetischer Strahlung im Wellenlängenbereich von 193 nm bis 1500 nm eingesetzt werden. Dabei ist es möglich, für jeden einzelnen der bis zu einer Million Bildpunkte (Pixel) die Intensität mit hoher Geschwindigkeit einzustellen.

Durch diese Arbeit soll ein Konzept für den Messeaussteller erarbeitet und dieses praktisch umgesetzt werden. Die Hauptgesichtspunkte liegen im Entwurf von Optik, Elektronik und Mechanik des Aufbaus. Eigenschaften des Designs sollen Funktionalität, Messetauglichkeit und Nutzerfreundlichkeit sein.

<sup>1</sup> SLM = spatial light modulator = Flächenlichtmodulator

<sup>2</sup> DLP = Digital Light Processing [5]

<sup>3</sup> PCB = printed circuit board, Leiterplatte

<sup>4</sup> CTP = Computer-to-Plate, digitale Druckplattenbelichtung



## 2 Grundlagen

### 2.1 Prinzip des Ausstellers

Das Prinzip des Ausstellers entspricht dem einer sogenannten Propelleruhr. Bei einer solchen Anordnung ist auf den Flügeln eines Propellers eine Reihe von LEDs angebracht. Wird der Propeller in Rotation versetzt und werden die LEDs zu entsprechenden Zeiten eingeschaltet, werden Strukturen in der Fläche erzeugt, welche von den LEDs überstrichen wird. Bei genügend hoher Rotationsfrequenz lässt sich aufgrund der Trägheit des menschlichen Auges ein stehendes Bild wahrnehmen. Dabei können auch Animationen oder Laufschrift dargestellt werden. Analog ist eine Bilddarstellung mit einem Zeilen-SLM möglich, indem eine optische Abbildung in Form eines Streifens bzw. Linie erzeugt und diese in einer linearen Bewegung über einen Schirm bewegt wird.

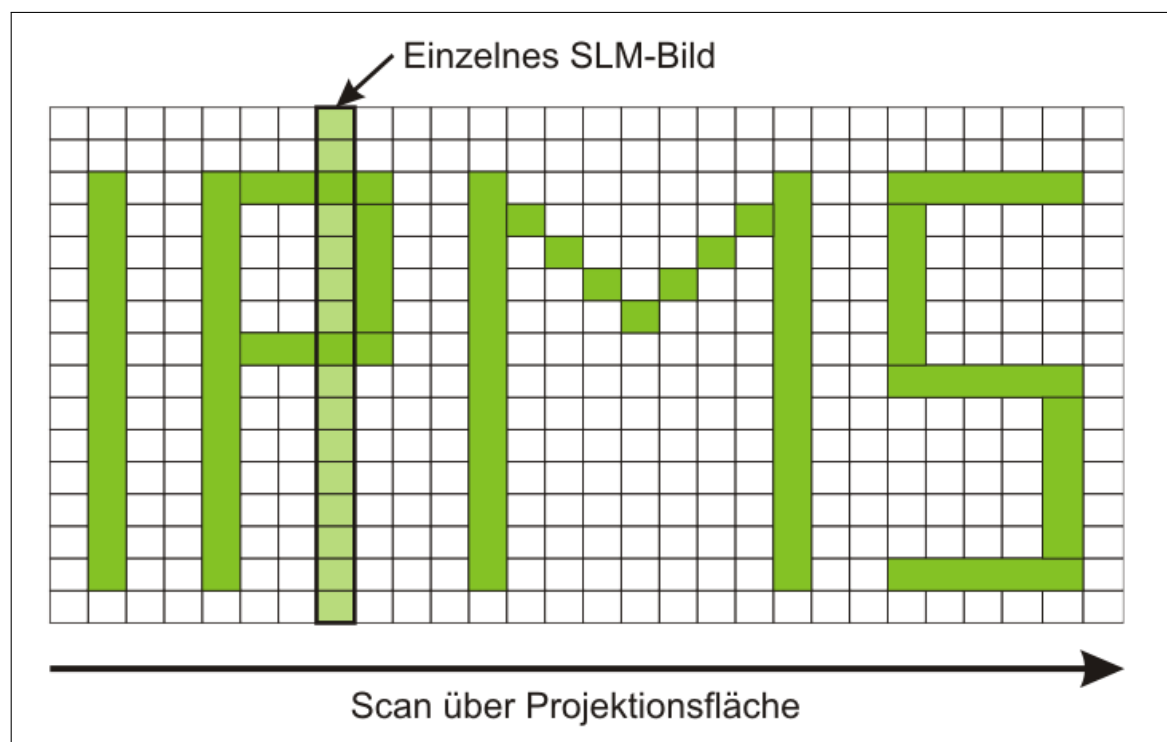


Abbildung 2.1: Flächige Projektion durch den Scan eines eindimensionalen Streifens

Das modifizierte Prinzip der Propelleruhr ist in Abb. 2.1 für den Einsatz eines Lichtmodulators dargestellt. Dazu wird mit dem Zeilen-Lichtmodulator durch Bestrahlung mit einem Laser eine eindimensionale Abbildung generiert. Eine einzelne SLM-Abbildung entspricht dabei einer Spalte des darzustellenden Gesamtbildes. Der SLM führt eine Intensitätsmodulation des gescannten Streifens durch. Die Bildinformationen des Streifens kommen durch die Abbildung des SLM, welche im Abschnitt „2.4.2 Abbildungsprinzip“ näher beschrieben wird, zustande. Um ein flächiges Gesamtbild zu erzeugen,

wird diese Abbildung schnell über eine Projektionsfläche bewegt. Die Ablenkung des einzelnen Spaltenbildes wird mit einer optischen Ablenkeinheit (siehe „3.3 Scan-Einheiten“, Seite 17) realisiert. Diese Ablenkung wird im Folgenden als Scan<sup>5</sup> bezeichnet.

## 2.2 Komponenten des Ausstellers

Der Aussteller besteht aus 5 grundlegenden Komponenten.

- Laser
- Optikaufbau
- SLM-Bauelement
- Scan-Einheit
- Projektionsschirm

Abb. 2.2 zeigt eine Übersicht über die Verknüpfung der Hauptkomponenten. Ausgeschlossen ist hierbei der optische Aufbau (Linsen, Spiegel, etc.), welcher im Kapitel „3 Optik“ ab Seite 15 gesondert erläutert werden soll.

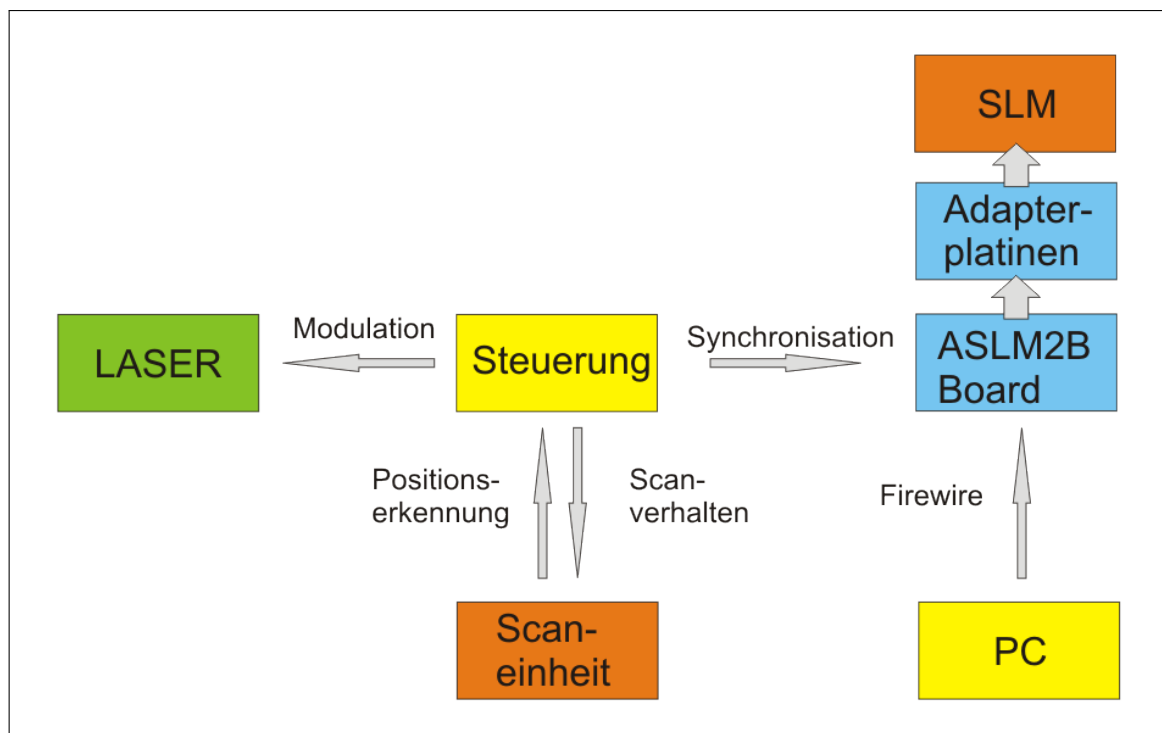


Abbildung 2.2: Blockschaltbild der Hauptkomponenten des Ausstellers

<sup>5</sup> von engl. to scan = abrastern, abtasten

Der SLM-Chip benötigt für seine Funktion im Aussteller zwei zusätzliche Komponenten. Das ist einerseits das ASLM2B-Board<sup>6</sup>, welches die Ansteuerung und Adressierung des Lichtmodulators übernimmt, und andererseits einen Adapter, um die Datenleitungen der 256 logischen Pixel des SLM an die Ausgangskanäle des Boards anzupassen. Weitere Hauptkomponenten des gesamten Aufbaus sind der Laser (Abschnitt „3.1 Laser“ auf Seite 15) und die Scan-Einheit (Abschnitt „3.3 Scan-Einheiten“ auf Seite 17). Ergänzt werden die bereits erwähnten Teile durch eine eigens dazu entworfene Steuerungsschaltung, welche die Synchronisation und das Timing zwischen den Komponenten übernimmt und im Kapitel „4 Elektronik“ ab Seite 21 erläutert wird.

## 2.3 Forderungen an den Aussteller

Aufgrund des geplanten Einsatzes des Ausstellers auf Messen und zu Promotionzwecken lassen sich folgende Forderungen, welche der Aussteller erfüllen muss, ableiten:

1. einfache Bedienung  
wenig Schnittstellen / unabhängiger Betrieb  
möglichst keine Justage am Einsatzort
2. robust  
schock-unempfindlich
3. geringe Laserleistung / Lasersicherheit
4. möglichst hoher Kontrast
5. variabler Bildinhalt

Prinzipiell können alle Punkte unter dem Begriff Messe- und Promotiontauglichkeit zusammengefasst werden. Der Aussteller soll sowohl optisch als auch funktional für eine große Menge an Interessenten ansprechend sein. Nur wenn der Aussteller mit positiver Resonanz vom Betrachter wahrgenommen wird, kann er seiner eigentlichen Aufgabe, der Vorführung des Flächenlichtmodulators, gerecht werden. Es sollen im Folgenden jedoch alle Punkte näher erläutert werden.

**zu 1.** Da der Aussteller größtenteils mobil, d.h. auf Messen und zur Präsentation des Lichtmodulators, eingesetzt werden soll und somit von unterschiedlichen Personen in Betrieb genommen wird, muss eine einfache Bedienung gewährleistet werden. Dazu gehört vor allem die Vermeidung von Justage- und Aufbauarbeiten am Einsatzort. Weiterhin sollte der Aussteller möglichst im Betrieb keine Bedienung benötigen und, wenn möglich, mit wenigen Schnittstellen zu anderer Hardware (z.B. Laptop) ausgerüstet sein. Die Forderung, den Aussteller mit möglichst wenig Schnittstellen auszustatten, wird schon durch die gewählten Komponenten (Abb. 2.2) gewährleistet. Im Schema ist zu erkennen, dass die einzige Schnittstelle

---

<sup>6</sup> Steuerungsboard, welches vom IPMS bereitgestellt wurde

eine Firewire-Verbindung zu einem Laptop oder PC ist. Dazu kommt nur noch die Spannungsversorgung für die Geräte bzw. Schaltungen. Die verschiedenen Spannungspegel werden intern im Aussteller erzeugt, so dass nur die Versorgung mit Netzspannung (230 V AC) nötig ist.

- zu 2.** Für den dauerhaften und zuverlässigen Betrieb muss das Gerät so konstruiert werden, dass es den Transport zum Einsatzort unbeschadet übersteht. Das Transportieren durch Kurier, Flugzeug oder Paketdienst birgt die Gefahr des unsachgemäßen Umgangs mit dem Transportgut. Daher müssen die Komponenten des Aufbaus so ausgelegt werden, dass Verkippen, Schütteln und heftige Stöße den Aufbau in seiner Funktionsfähigkeit nicht beeinflussen. Dafür sind eine robuste Konstruktion und ein geeignetes Gehäuse notwendig.
- zu 3.** Aufgrund seines Verwendungszwecks sind ständig Menschen im Kontakt mit dem Aussteller, und dadurch, dass die Bilddarstellung mit Laserstrahlung erfolgt, muss ein hohes Augenmerk auf die Lasersicherheit des Gerätes gelegt werden. Der Aufbau sollte insgesamt so ausgelegt sein, dass sowohl der Bediener als auch die Betrachter nicht in Kontakt mit der Laserstrahlung gelangen. Wenn dies doch der Fall sein kann, muss unbedingt gewährleistet sein, dass die Strahlungsquelle bzw. der zugängliche Bereich der Strahlung so dimensioniert werden, dass keine Gefahr für den Mensch besteht und somit alle notwendigen Lasersicherheitsbestimmungen eingehalten werden.
- zu 4.** Der Betrieb des Ausstellers wird vorrangig bei Tageslicht bzw. sogar mit erhöhter Umgebungsbeleuchtung erfolgen. Es muss aufgrund dessen versucht werden, die Bilddarstellung so zu gestalten, dass sie einen möglichst hohen Kontrast aufweist.
- zu 5.** Um das Bild für den Betrachter attraktiv und interessant zu gestalten, sollte der Aussteller kein statisches Bild liefern. Ziel ist z. B. die aktuelle Uhrzeit, eine Laufschrift oder Animationen darzustellen.



## 2.4 Grundlagen Flächenlichtmodulator

### 2.4.1 Aufbau und Ansteuerung der Flächenlichtmodulatoren

Ein Lichtmodulator kann aus über einer Million Einzelspiegeln im  $\mu m$ -Bereich bestehen. Abb. 2.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Einzelspiegels. Jeder Einzelspiegel besteht aus einer beweglichen Platte, einer pfostenförmigen Halterung und einer Anordnung von Elektroden. Die Spiegel der am IPMS entwickelten SLMs stellen sogenannte Torsionsspiegel dar, welche eine Verkippung der Spiegelfläche ermöglichen. Ausgehend von der Grundfläche der Spiegelelektrode, welche sich auf derselben Höhe wie die zwei anderen Elektroden befindet, geht ein Pfosten nach oben, welcher über einen schmalen Steg mit der Spiegelfläche verbunden ist. Dieser schmale Steg dient im Spiegelverbund als Torsionselement.

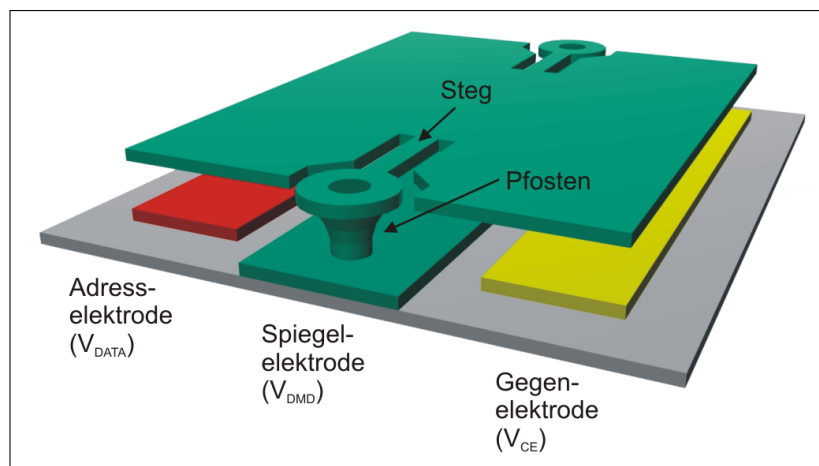


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung eines Einzelspiegels (3D)

Jedes einzelne Spiegelement verfügt über drei Elektroden. Zwei davon liegen unter dem Spiegel, die Adresselektrode und die Gegenelektrode. Der Spiegel selbst bildet die dritte Elektrode. Alle dieser drei Elektroden können mit unterschiedlichen elektrischen Potenzialen belegt werden.

Die Kurzbezeichnungen, wie  $V_{DATA}$ , dienen der Verwendung in Schaltplänen und in Steuerungssoftware. Es handelt sich nicht mehr um die eigentliche Benennung der Elektroden, sondern um die Potenziale an den Elektroden. Zu beachten ist, dass die Spiegelelektroden und die Gegenelektroden jeweils für alle Spiegel auf einem Chipgebiet verbunden sind. D.h. alle Spiegel erhalten über diese beiden Elektroden dasselbe Potenzial. Aus diesem Grund werden diese Elektroden auch Globalelektroden genannt. Die REM<sup>7</sup>-Aufnahme in Abb. 2.4 zeigt quadratische Spiegelflächen mit einer Kantenlänge von  $16 \mu m$ . Die Anordnung der Elektroden unter den Spiegeln ist auch zu erkennen. Zur Sichtbarmachung der Elektroden wurden einige Spiegel entfernt.

<sup>7</sup> Raster-Elektronen-Mikroskop

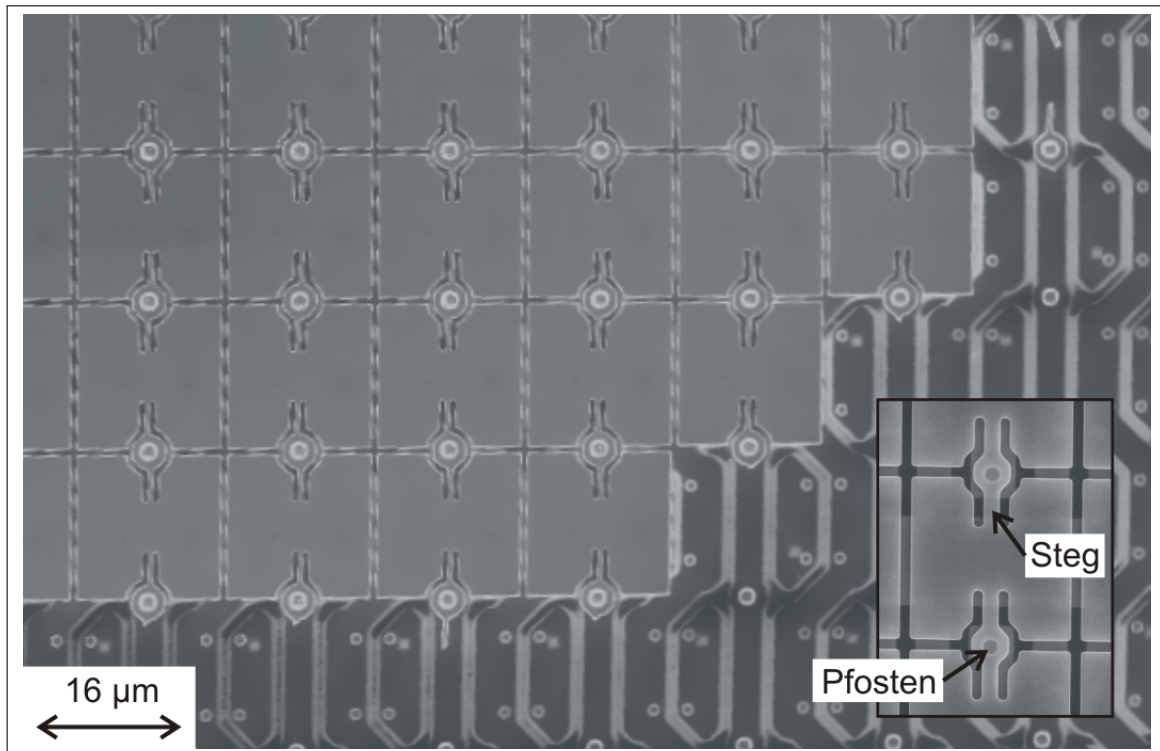


Abbildung 2.4: REM-Aufnahme von Spiegeln und Elektroden

Um die Spiegel auszulenken, müssen an die drei Elektroden Spannungen angelegt werden. Als Auslenkung der Spiegel wird bei dem verwendeten SLM-Bauelement eine Verkipfung der Spiegelfläche gegenüber seiner Ruhelage bezeichnet. Die Auslenkung  $d$  wird hierbei in der am IPMS gebräuchlichen Definition zwischen Mitte des Spiegels und seinem Rand gemessen (siehe Abb. 2.5).

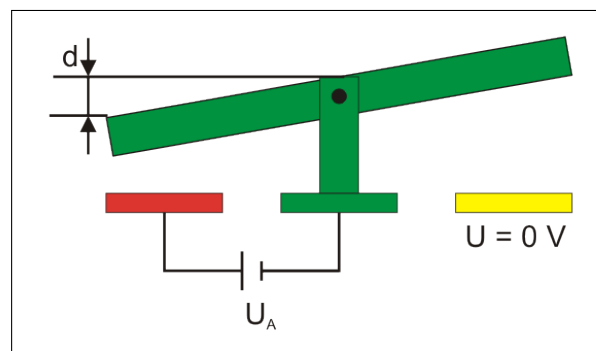


Abbildung 2.5: Auslenkung eines Einzelspiegels

Die Ansteuerung der Spiegel geschieht durch elektrostatische Kräfte. Durch das Anlegen unterschiedlicher Potenziale an die Elektroden wird zwischen der Spiegelfläche und den darunterliegenden Elektroden eine Potenzialdifferenz erzeugt. Die Spannung  $U_A$  erzeugt eine elektrostatische Kraft zwischen Spiegelfläche und den Elektroden. Durch die erzeugte Kraft wird ein Drehmoment auf die Spiegelfläche ausgeübt. Da die Verbindung der Spiegelfläche zum tragenden Pfosten nur durch einen schmalen Steg ausgeführt ist,

ist es möglich, diesen Steg zu verdrehen und somit die Spiegelfläche in einem definierten Winkel zu verkippen, d.h. die Spiegelfläche wird ausgelenkt. Wird an die Spiegel- und Gegenelektrode ein konstantes Potenzial angelegt (im vorliegenden Falle 0 V), so kann durch Variation des Adresselektrodenpotenzials die Auslenkung  $d$  der Spiegel beeinflusst werden. Dabei ergibt sich folgende typische Auslenkkurve:

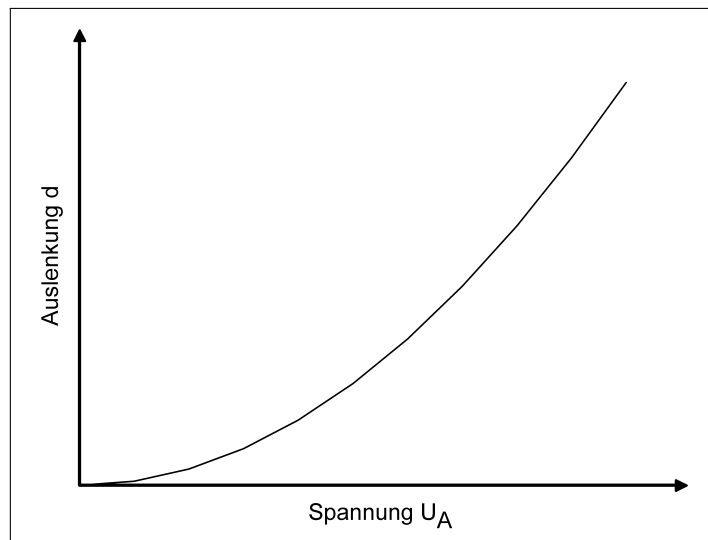


Abbildung 2.6: Abhängigkeit der Auslenkung  $d$  von der Spannung  $U_A$

Zwischen der Auslenkung  $d$  und der Spannung  $U_A$  besteht ein nichtlinearer Zusammenhang. Für das grundlegende Verhalten reicht die Angabe der folgenden Proportionalität:

$$d \propto \sin(U_A^2) \quad (2.1)$$

## 2.4.2 Abbildungsprinzip

Das Funktionsprinzip des eingesetzten Lichtmodulators beruht auf Beugungserscheinungen. Die Matrix aus mikroskopisch kleinen Einzelspiegeln bildet ein Blaze-Gitter. Zur Darstellung des grundlegenden Abbildungsprozesses zeigt Abb. 2.7 schematisch den Aufbau inklusive Strahlengang.

Die Abbildung zeigt einen reflektierenden Lichtmodulator, auf dem senkrecht mit einem Strahlteiler Licht eingekoppelt wird. Es handelt sich dabei um eine quasi parallele und homogene Ausleuchtung. Im Aussteller wird die Einkopplung nicht senkrecht auf den SLM erfolgen, sondern unter einem Winkel. Auf den Strahlteiler kann dadurch verzichtet werden, jedoch soll das Prinzip der Bildentstehung durch den SLM an der hier verwendeten Abbildung erläutert werden.

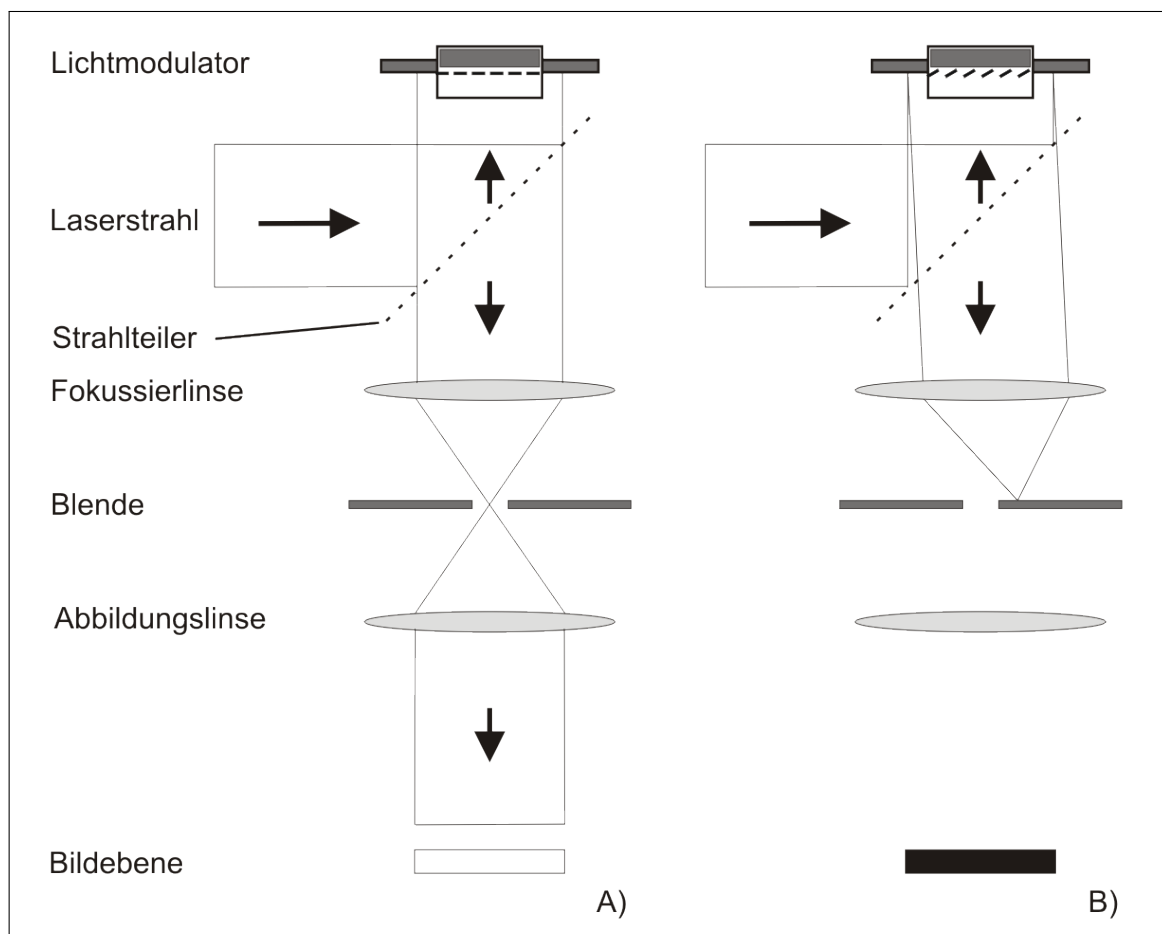


Abbildung 2.7: Abbildungsprinzip für einen phasenmodulierenden Lichtmodulator

Die Erzeugung von Strukturen durch den Lichtmodulator geschieht infolge einer Verkipfung von Einzelspiegeln. Es werden verschiedene Bereiche der Einzelspiegel durch eine Elektronik adressiert und elektrostatisch ausgelenkt. Dadurch kann der Blaze-Winkel  $\alpha_B$  des Gitters variiert werden. Fällt ein paralleler, monochromatischer Lichtstrahl auf das Gitter, wird das Licht am Gitter in die Ordnungen  $m = -2, -1, 0, 1, 2$  etc. gebeugt. Wenn die Spiegel nicht ausgelenkt sind (Abb. 2.7 A) und Abb. 2.8 A)), wird das Licht in der nullten Beugungsordnung konzentriert. Sind die Spiegel jedoch ausgelenkt, d.h.  $\alpha_B > 0^\circ$ , erfolgt die Beugung in höhere Ordnungen  $m \neq 0$  (Abb. 2.7 B) und Abb. 2.8 B)). Die Phase des einfallenden Lichtes wird aufgrund des Wegunterschiedes an den ausgelenkten Spiegeln moduliert. Diese Phasenmodulation durch den SLM hat eine Veränderung der Hauptbeugungsrichtung des Lichtes im Verlauf nach dem SLM zur Folge.

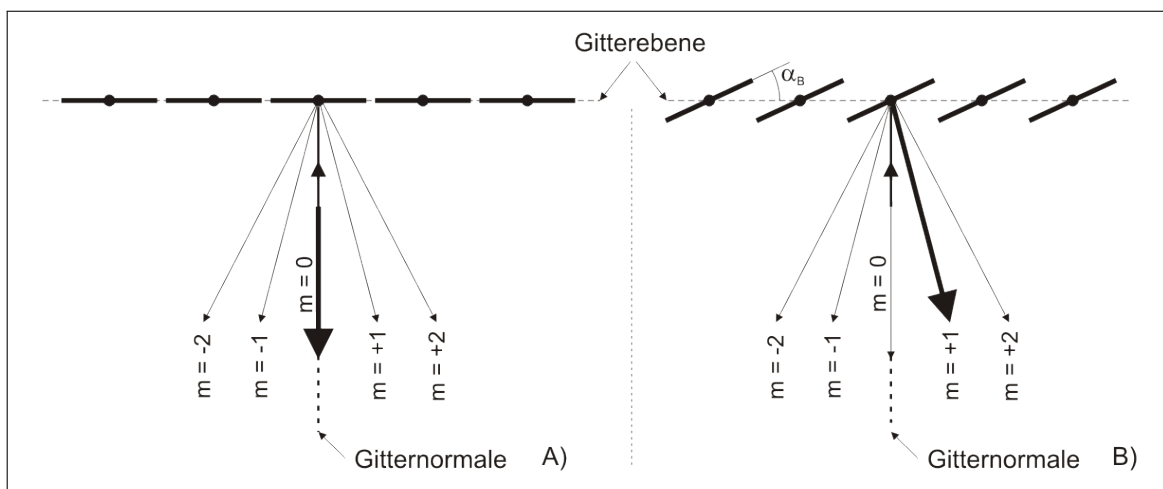


Abbildung 2.8: Gitteranordnung der Einzelspiegel

Das Wellenfeld wird mit der Fokussierlinse  $L_F$  bildseitig in der Brennebene fokussiert. In welche Ordnung das Licht vorrangig gebeugt wird, ist nur von der Auslenkung der Einzelspiegel abhängig und somit für alle Spiegel des Modulators gleich. In der Brennebene von  $L_F$  entsteht ein punktförmiges Muster, wobei jeder Punkt einer Beugungsordnung des Gitters entspricht. Die Abbildungslinse  $L_P$  hat die Aufgabe, die durch den Modulator gebeugten Teilwellen in der Bildebene wieder phasenrichtig zusammenzufassen. Würden alle Beugungsordnungen ungehindert übertragen werden, d.h. befände sich keine Blende im Strahlengang, ergäbe sich in der Bildebene wieder der gleiche Intensitätsverlauf wie bei der Ausleuchtung des SLM. Der SLM soll aber in der Bildebene ein Intensitätsprofil erzeugen, welches mit dem Phasenprofil bzw. der Adressierung des Modulators korreliert. Dazu ist es notwendig, in der Brennebene der Linse  $L_F$  mit Hilfe einer Blende eine oder mehrere Beugungsordnungen auszublenden. In Abb. 2.7 ist eine Blendenanordnung gezeigt, welche immer nur die nullte Beugungsordnung passieren lässt. Helle Gebiete in der Bildebene entstehen nur, wenn der Modulator in diesen Bereichen nicht adressiert wird und somit die nullte Beugungsordnung die Blende passieren kann. Sobald Spiegelgebiete des SLM ausgelenkt werden, wird das Licht vorrangig in höhere Ordnungen gebeugt, wird von der Blende blockiert, und es ergibt sich

ein dunkles Gebiet in der Bildebene. Die Phasenmodulation durch den Lichtmodulator wird demnach in eine Intensitätsmodulation des Lichts in der Bildebene umgewandelt.

$$I \propto \text{sinc}^2\left(\frac{d}{d_N}\right) \quad (2.2)$$

$$\text{mit } d_N = \frac{\lambda}{4} \quad (2.3)$$

Abb. 2.9 zeigt den prinzipiellen Verlauf der Auslenkung und somit auch der Intensität des Bildelements eines Einzelspiegels in der nullten Beugungsordnung in Abhängigkeit von der Spannung  $U_A$  nach Gleichung 2.2.

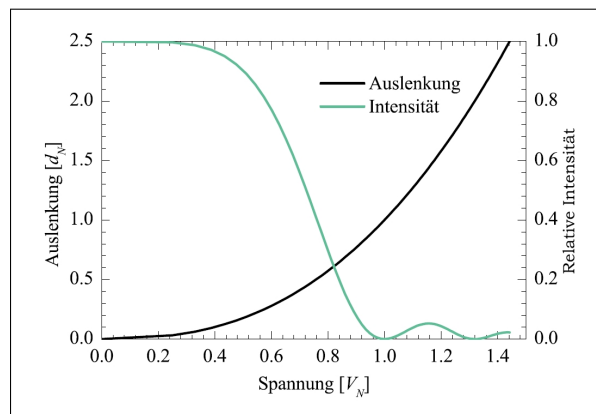


Abbildung 2.9: Auslenkung und Intensität der nullten Ordnung in Abhängigkeit von der Spannung  $U_A$  [2]

In dem Diagramm werden alle Größen normiert dargestellt, wobei sich alle Größen auf die Werte des ersten Minimums im Intensitätsverlauf der nullten Beugungsordnung beziehen. Wichtige Größe dabei ist die Nennauslenkung  $d_N$ , welche für den idealisierten Fall dieser Betrachtungen ein Viertel der zur Bestrahlung des SLM benutzten Wellenlänge  $\lambda$  beträgt (siehe Gleichung 2.3).

Die zur Anwendung kommenden Spiegel haben eine Kantenlänge von  $16 \mu\text{m}$ . Daraus ergibt sich bei einer Wellenlänge von  $532 \text{ nm}$  für die Nennauslenkung  $d_N = 133 \text{ nm}$  eine Verkipfung der Spiegelfläche um lediglich  $\approx 1^\circ$ .

## 2.5 Bauelement Zeile256

Für den Einsatz im Aussteller ist das neuentwickelte SLM-Bauelement mit der Bezeichnung Zeile256 vorgesehen. Zur Anwendung kommt ein Spiegelgebiet mit  $256 \times 100$  Spiegeln. Es handelt sich dabei um quadratische Einzelspiegel mit einer Kantenlänge von  $16 \mu m$ . Die 100 Spiegel in horizontaler Richtung erhalten die selben Datenspannungen und bilden damit ein logisches Pixel des SLM. Davon gibt es folglich 256, welche jeweils über eigene Dateneingänge (Adresselektrode) einzeln adressiert werden können. Das gesamte Spiegelgebiet hat eine Dimension von ca.  $4 mm \times 1,6 mm$ .

Auf dem Bauelement Zeile256 befinden sich noch 19 weitere Spiegelgebiete, welche nur zum Teil elektrisch kontaktiert sind und unterschiedliche Spiegelgeometrien besitzen. Für den Aussteller wird jedoch nur das beschriebene Spiegelgebiet verwendet. Dadurch, dass die kontaktierten Spiegelgebiete über separate Globalspannungen angesteuert werden können, ist es möglich nur das bekannte Spiegelgebiet für die Bilddarstellung im Messeaussteller zu verwenden.

Das Bauelement Zeile256 wird in einem ZIF<sup>8</sup>-Sockel kontaktiert. Die Zuleitung der für die Auslenkung benötigten Spannungen erfolgt mit einem geeigneten Steuerungsboard. Diese hochkomplexe elektronische Schaltung schafft aus definierten Eingangsdaten (meist Bitmaps) nach einer festgelegten Codierung die notwendigen Spannungen für die Adressierung der logischen Pixel.

---

<sup>8</sup> ZIF = zero insertion force = Nullkraftsockel





### 3 Optik

Der optische Aufbau des Ausstellers besteht aus folgenden Komponenten:

- Laser
- Strahlformungsoptik
- Flächenlichtmodulator
- Abbildungsoptik
- Scaneinheit

Aufbau und Funktionsweise des Flächenlichtmodulators wurde bereits im Abschnitt „2.4 Grundlagen SLM“ ab Seite 7 behandelt. Abb. 3.1 zeigt schematisch den optischen Strahlverlauf des Ausstellers in der Seitenansicht. Zur Vereinfachung handelt es sich um den aufgefalteten Strahlengang. Im Aufbau an sich wird der SLM reflektiv gebraucht und unter einem festgelegten Winkel bestrahlt.

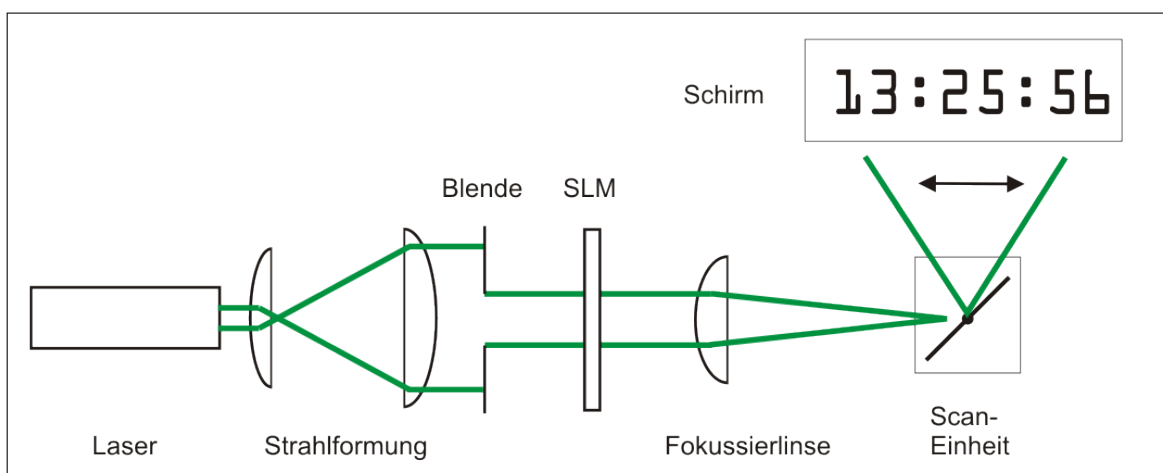


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des optischen Aufbaus

#### 3.1 Laser

Für den Einsatzfall muss der Laser kompakt, leicht und von ausreichender Leistung sein, um ein tageslichtfähiges Bild projizieren zu können. Weitere Bedingungen sind eine geringe Betriebsspannung und die Möglichkeit der Modulation der Strahlung, d.h. der Laser muss mit anderer Hardware synchronisiert werden können. Diesen Anforderungen genügt das DPSS-Lasermodul<sup>9</sup> Flexpoint<sup>®</sup> der Firma Laser Components mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 532 \text{ nm}$  und einer Leistung von  $P = 10 \text{ mW}$ . Der Laser wird bei

<sup>9</sup> DPSS-Laser = diode pumped solid state laser = diodengepumpter Festkörperlaser

einer Spannung von 5 V DC betrieben und lässt sich durch ein 5-V-TTL<sup>10</sup>-Signal oder einen Analogpegel mit bis zu 3 kHz modulieren.

Die Wahl der Wellenlänge ist bedingt durch die Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges. Dies hat den Vorteil, dass mit einem grünen Laser deutlich weniger optische Leistung benötigt wird, als bei anderen Farben, um den gleichen Helligkeitseindruck zu erzielen.

## 3.2 Strahlformungsoptik

Der Rohstrahl direkt am Laser hat einen Durchmesser von 1,6 mm. Davon ausgehend muss ein Beleuchtungsfleck mit einer Höhe von ca. 4 mm und einer Breite von ca. 1,6 mm erzeugt werden. Diese Maße entsprechen den Abmessungen des Spiegelgebietes des SLM. Zur Formung des Strahls wird ein Paar Zylinderlinsen verwendet. Die zwei Linsen bilden zusammen eine Teleskopanordnung nach dem Keplerschen Prinzip<sup>11</sup>. Der Rohstrahl wird nur in seiner vertikalen Achse vergrößert, um damit das aktive Spiegelgebiet zu beleuchten. Die beiden Zylinderlinsen strecken den Strahl, sodass sich eine Ellipse ergibt. Um Streulicht und ungewollte Reflexionen von Umgebungsgebieten der Spiegel zu vermeiden, wird der elliptische Strahl mit einer einstellbaren Blende auf seine eigentlich benötigte Größe beschnitten. Es wird ausschließlich das aktive Gebiet bestrahlt.

Der verwendete Laser weist ein gaußähnliches Intensitätsprofil auf. Durch eine Aufweitung bleibt dieses Profil erhalten und würde im gescannten Bild erkennbar sein. Um dies zu vermeiden, wird der Rohstrahl mehr als eigentlich nötig aufgeweitet und die Randgebiete des Gaußprofils beschnitten. Dadurch entsteht einen Beleuchtungsfleck mit einer geringen Intensitätsvariation, und es wird im Scan ein zufriedenstellendes Resultat erzielt.

---

<sup>10</sup> TTL = Transistor-Transistor-Logik

<sup>11</sup> Anordnung mit zwei Sammellinsen

### 3.3 Scan-Einheiten

Zur Ablenkung der eindimensionalen Abbildung des SLM und damit zur Erzeugung eines flächigen Bildes gibt es verschiedene Varianten. Folgende werden hier diskutiert:

- Polygonscanner
- Galvoscanner

#### 3.3.1 Polygonscanner

Polygonscanner sind optische Bauelemente, welche einen Laserstrahl mit einem rotierenden Spiegelprisma (Polygon) in einer Richtung ablenken. Das Polygon rotiert, angetrieben durch einen Elektromotor, mit konstanter Geschwindigkeit und lenkt den Strahl beim Durchlaufen einer Facette des Polygons einmal komplett durch das Scanfeld ab. Eine Facette ist dabei eine Seite des verspiegelten Prismas. Die Anzahl der spiegelnden Facetten bestimmt den möglichen Scanwinkel, der mit einem solchen Scanner realisiert werden kann. Der Einsatz eines Polygonscanners im Aussteller ist in Betracht gezogen worden, jedoch aus verschiedenen Gründen wieder verworfen worden. Ein Low-cost-Produkt hätte nicht die Parameter, welche für die Anwendung nötig sind. Die Einzelanfertigung eines Prismas, angepasst auf die benötigte Facettenzahl, Durchmesser und Höhe, und die Wahl eines geeigneten Motors hätten den finanziellen Rahmen gesprengt.

#### 3.3.2 Galvanometerscanner

Galvanometerscanner (kurz: Galvoscanner) arbeiten nach dem Prinzip von Drehspulengeräten. Auf einer durch die elektromotorische Kraft angetriebenen Drehachse sitzt ein Laserspiegel, welcher dazu dient, den Laserstrahl um einen einstellbaren Winkel abzulenken. Die Winkelbewegung der Drehachse ist begrenzt. Durch die Konstruktion mit Präzisionskugellagern und einem starren Gehäuse erfüllen Galvoscanner höchste Genauigkeitsanforderungen bezüglich Positionierung, Wobbeln<sup>12</sup> und Reibung. Zusätzlich bietet ein Galvoscanner im Gegensatz zu Polygonscannern die Möglichkeit einer statischen Auslenkung. Es werden Closed-loop-Scanner und Open-loop-Scanner unterschieden. Closed-loop-Scanner besitzen im Gegensatz zur Open-loop-Variante einen integrierten Positionssensor, welcher über eine Regelschaltung dafür sorgt, dass die geforderte Spiegelauslenkung auf das Genaueste erreicht bzw. eingehalten wird.

---

<sup>12</sup> ungewollte, störende Schwingungen

Im Aussteller wird der Galvoscanter Littrack der Firma JMLaser mit folgenden Parametern verwendet:

- maximale Auslenkung:  $\pm 15^\circ$  mechanisch
- Scanfrequenz: bis ca. 300 Hz
- nutzbare Spiegelfläche:  $8 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$

### 3.4 Abbildungsoptik

Die Abbildungsoptik, welche im Aussteller verwendet wird, unterscheidet sich von der Anordnung, welche in Abb. 2.7 dargestellt ist. Der Unterschied besteht darin, dass sowohl auf die Blende als auch auf die Abbildungslinse  $L_P$  verzichtet wird. Darüber hinaus wird die Fokussierlinse  $L_F$  als Zylinderlinse mit einer Brennweite von 40 mm ausgeführt und übernimmt allein die abbildende Funktion. Die Zylinderlinse fokussiert den Strahl in der vertikalen Achse. Dies sorgt dafür, dass der Strahl im bildseitigen Brennpunkt von  $L_F$  einen sehr geringen Durchmesser hat. An dieser Stelle wird der Spiegel des Galvoscanners gesetzt. Die Fokussierung ist notwendig, da der Spiegel des Scanners nur eine Fläche von ca.  $8 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  hat. Die Filterung der Beugungsordnungen übernimmt die Spiegelfläche des Scanners. In der Brennebene der Zylinderlinse sind die Beugungsordnungen soweit getrennt, dass vom Spiegel des Galvoscanners nur die zur Darstellung genutzte nullte Beugungsordnung erfasst und reflektiert wird. Die anderen Ordnungen gelangen durch die räumliche Trennung nicht mit auf die Scannerfläche und werden dadurch nicht in die Bildebene projiziert.

Der Einsatz der Zylinderlinse hat noch eine weitere Funktion gegenüber einer sphärischen Linse. Dieser besteht in der Tatsache, dass die Zylinderlinse den SLM nur in der Vertikalen abbildet. Die horizontale Ausdehnung der Abbildung entspricht den Dimensionen des Spiegelgebietes. Es entsteht eine streifenförmige Abbildung, welche gescannt wird.

Der Grund für die Wahl der Zylinderlinse liegt in der günstigeren Darstellung von Hell-Dunkel-Übergängen (Abb. 3.2). Erfolgt während des Scans des Projektionsstreifens ein Wechsel zwischen hellen und dunklen Bildern, ist auf dem Schirm ein kontinuierlicher Übergang zu erkennen. Um ein gutes Bild mit scharfen Kanten zu erzielen, muss dieser Übergang möglichst schmal sein. Diese Forderung kann mit einer Zylinderlinse umgesetzt werden. In der Abbildung ist erkennbar, dass die Breite des Hell-Dunkel-Übergangs im Bild stark davon abhängt, wie breit der verwendete Projektionsstreifen ist. Bei schmalen Streifen überlappen sich die Streifen weniger bzw. in einem kleineren Gebiet, und dadurch erfolgt auch der Hell-Dunkel-Übergang begrenzter. Für eine Projektion mit klaren Hell-Dunkel-Wechseln ist es unumgänglich, den Streifen, welcher über den Schirm bewegt wird, möglichst schmal zu gestalten. Dies ist mit einer sphärischen Linse zur Abbildung nicht möglich.

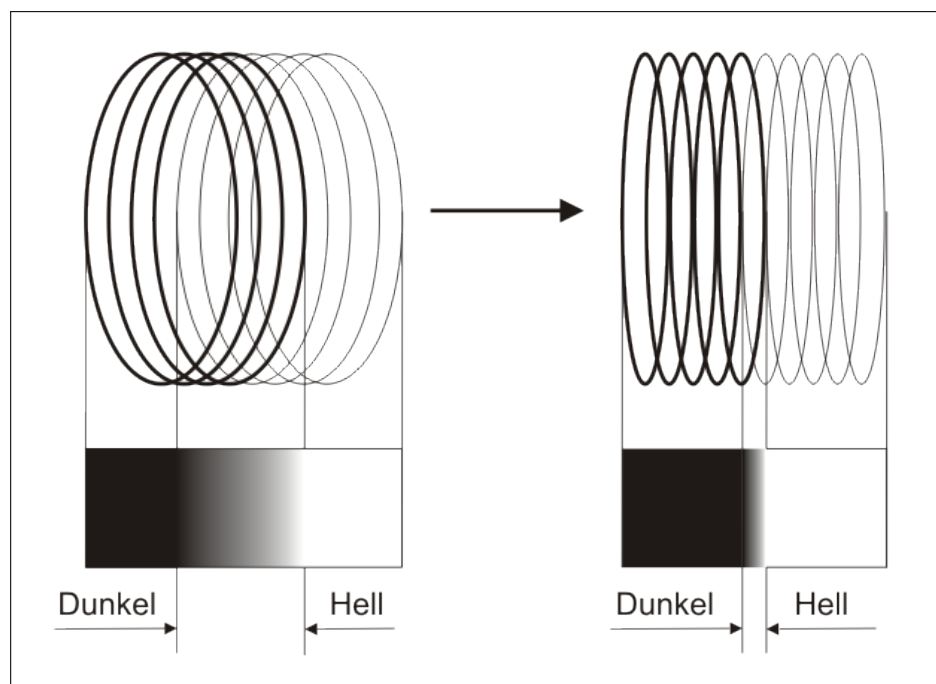


Abbildung 3.2: Hell-Dunkel-Übergang bei verschiedenen Streifenbreiten



## 4 Elektronik

Die Elektronik für den Messeaussteller kann in folgende Teile gegliedert werden:

- Umverdrahtung der Pixelzuordnung des SLM
- Steuerungs- und Timingschaltung

### 4.1 Pixelansteuerung

Das SLM-Bauelement wird standardmäßig in einem Sockel7 mit 321 Kontakten eingesetzt. Davon sind 256 durch Datenleitungen und 10 durch Globalspannungen belegt. Die restlichen Pins sind nicht kontaktiert oder werden für die Anwendung nicht benötigt. Jede der 256 Datenleitungen speist ein logisches Pixel und wird somit an 100 Einzelspiegel weitergeleitet. Das Bauelement soll mit einem bereits vorhandenen Steuerungsboard angesteuert werden. Das Board verfügt jedoch nur über 16 Datenleitungen bzw. Kanäle. Jeder dieser Datenkanäle adressiert je 16 Pixel. Das macht es unmöglich, jedes der 256 logischen Pixel des SLM einzeln zu adressieren.

Die auf dem Board implementierte Verdrahtung würde zu Folge haben, dass Pixel 1, 17, 33, ... , 241 und Pixel 2, 18, 34, ... , 242 etc. jeweils die selben Daten erhalten (Abb. 4.1 oben). Für die Benutzung im Aussteller ist diese Art der Beschaltung der Pixel jedoch ungeeignet. Einerseits würden so schließlich 16 gleiche Bilder mit jeweils 16 Pixeln Höhe übereinander entstehen und andererseits hätte ein Bild nur eine Höhe von  $256\ \mu\text{m}$  auf dem SLM. Es wird jedoch nur ein Bild benötigt. Weiterhin müssten die nur  $256\ \mu\text{m}$  großen Bilder um den Faktor 160 vergrößert werden, um eine geeignete Bildhöhe von  $40\ \text{mm}$  im projizierten Bild zu erzielen. Um diese Nachteile zu umgehen, wird die Verdrahtung der Datenleitungen umsortiert. Das Ziel der angestrebten Pixelansteuerung ist es, nur ein Bild zu generieren. Es werden 16 nebeneinander liegende logische Pixel des SLM zu einem zusammengefasst. Dadurch entstehen auf dem SLM 16 Makropixel (Abb. 4.1 unten). Ein Bild auf dem SLM hat dann eine Höhe von ca.  $4\ \text{mm}$ , und es muss durch die Abbildung nur noch um den Faktor 10 vergrößert werden. Um dies zu erreichen, muss die Zuordnung der Datenleitungen des Boards zu den logischen Pixeln des SLM durch eine Schaltung umsortiert werden. Tabelle 4.1 zeigt die Kanal-Pixel-Zuordnung vor und nach der Umsortierung.

Der Abgriff der 16 Datenkanäle erfolgt mit einer Platine, deren Pins in den ZIF-Sockel des Boards eingesteckt werden. Der SLM sitzt in einem weiteren ZIF-Sockel, welcher sich auf einer kleinen Satellitenplatine befindet. Beide Platinen sind mit einem Flachbandkabel verbunden. Durch diese Kombination kann zum einen die Umverdrahtung realisiert werden, und zum anderen kann der SLM durch das Flachbandkabel flexibel positioniert

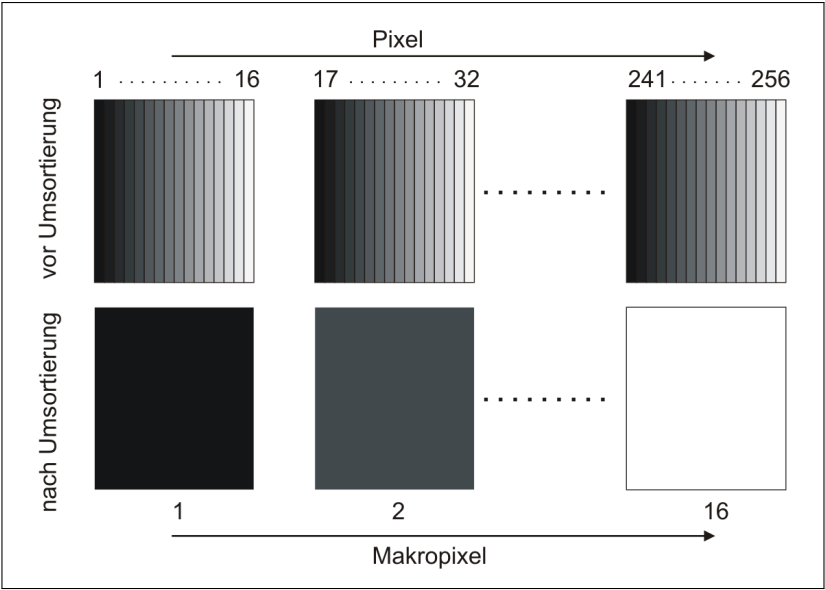


Abbildung 4.1: Schema der Umsortierung der Pixelzuordnung

vor Umsortierung		nach Umsortierung	
Kanal	Pixel	Kanal	Pixel
1	1	1	1
2	2	1	2
3	3	1	3
...	...	...	...
14	14	1	14
15	15	1	15
16	16	1	16
1	17	2	17
2	18	2	18
3	19	2	19
...	...	...	...
14	30	2	30
15	31	2	31
16	32	2	32
...	...	...	...
...	...	...	...
1	241	16	241
2	242	16	242
3	243	16	243
...	...	...	...
14	254	16	254
15	255	16	255
16	256	16	256

Tabelle 4.1: Umsortierung der Pixelzuordnung



werden. Abb. 4.2 zeigt das Layout der Platinen, und in Tabelle 4.2 ist die Belegung des Flachbandkabels festgehalten.

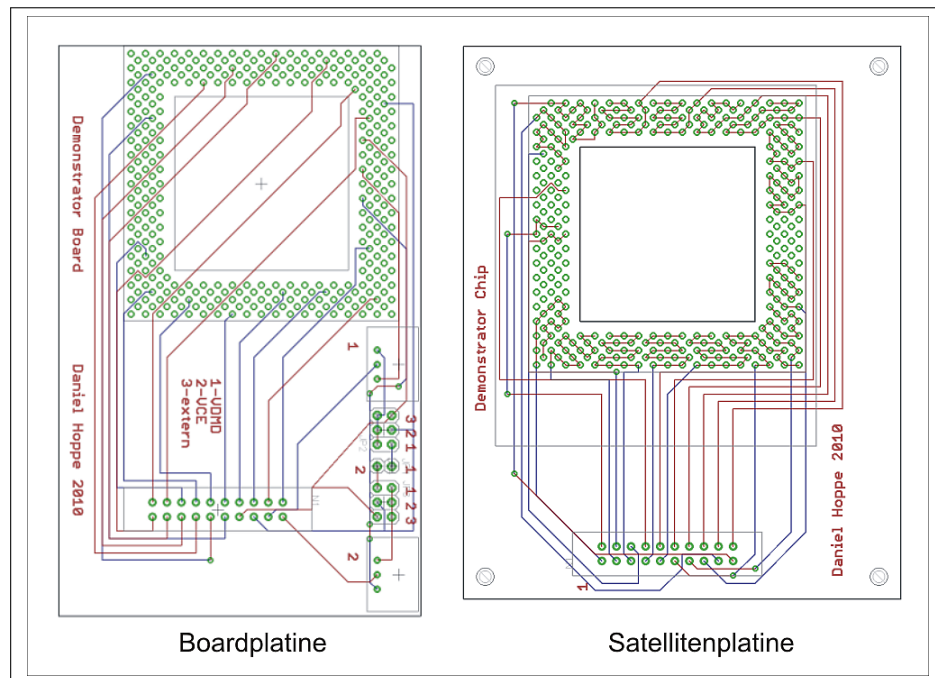


Abbildung 4.2: Platinen für die Umverdrahtung

Der Abgriff der Kanäle im ZIF-Sockel des Boards wurde so gewählt, dass die Pins sich möglichst gleichmäßig über den Sockel verteilen und so eine gute mechanische Stabilität der Verbindung gewährleisten. Wie bereits erwähnt, werden für den Gebrauch des SLM im Aussteller 16 Datenleitungen und die entsprechenden Globalspannungen benötigt.

Für die Pixelansteuerung bzw. Umsortierung müssen insgesamt 20 Pins des Sockels auf dem Board kontaktiert werden.

- 16 Datenspannungen Data 1 ... Data 16
- 2 Globalspannungen  $V_{CE}$  und  $V_{DMD}$
- 2 Massepins

Die zwei Globalspannungen für das wie in Abschnitt „2.5.1d“ auf Seite 13 beschriebene Spiegelgebiet werden direkt weitergeleitet. Die restlichen Globalspannungen der ungenutzten Spiegelgebiete müssen trotzdem angesteuert werden. Der Grund dafür ist, die Spiegel möglichst nicht auszulenken bzw. in einer kontrollierten Position zu halten. Die Globalspannungen werden nach ihrer Funktion als Potenzial für  $V_{CE}$  oder  $V_{DMD}$  der ungenutzten Spiegelgebiete in 2 Gruppen eingeteilt und separat angesteuert. Die Regelung der anliegenden Spannung erfolgt jeweils durch ein Potenziometer auf der Boardplatine. Mit den Potenziometern lassen sich die Spannungen über den kompletten Bereich der Eingangsspannung regeln. Es gibt dabei 3 verschiedene Möglichkeiten für die Eingangsspannung. Entweder es wird eine der beiden Globalspannungen  $V_{CE}$  oder

Leitung	Signal
1	Data 1
2	Data 2
3	Data 3
4	Data 4
5	Data 5
6	Data 6
7	Data 7
8	Data 8
9	Data 9
10	Data 10
11	Data 11
12	Data 12
13	Data 13
14	Data 14
15	Data 15
16	Data 16
17	VDMD
18	VCE
19	Global 1
20	Global 2

Tabelle 4.2: Belegung Flachbandkabel

$V_{DMD}$  des verwendeten Spiegelgebietes benutzt oder es wird eine extern angelegte Spannung benutzt. Die Auswahl der Eingangsspannung erfolgt über die Jumper der Boardplatine. Die Spannungen  $V_{CE}$  und  $V_{DMD}$  stehen onboard zur Verfügung, und die externe Spannung kann über dafür vorgesehene Pins eingespeist werden. Die Kombination aus Potenziometer, Jumper und Pin liegt auf der Boardplatine doppelt vor und dient dazu, die gruppierten Globalspannungen einzeln steuern zu können.

## 4.2 Steuerungsschaltung

Der Aussteller besitzt eine spezifisch entworfene, hardwarebasierte Steuerung. Für diese Schaltung wurde ein Leiterplatten-Layout geschaffen und alle notwendigen Komponenten auf dieser Leiterplatte vereint. Die Schaltung lässt sich in vier nach ihrer Funktion eingeteilte Blöcke gliedern.

1. Scannersteuerung
2. Timingschaltung
3. Taktgenerator
4. Sicherheitsschaltung

Für den Teil der Sicherheitsschaltung gibt es ein eigenes Kapitel „5 Sicherheit“ ab Seite 39, welches sowohl die Sicherheitsschaltung als auch alle verwendeten Sicherheitsmaßnahmen beinhaltet.

### 4.2.1 Scanner-Steuerung

Der im Aufbau verwendete Galvoscanter Litrack muss für den Scan des eindimensionalen SLM-Bildes mit einer konstanten Frequenz linear um seinen Nullpunkt schwingen. Das menschliche Auge nimmt Bilder ab einer Frequenz von ca. 60 Hz flimmerfrei wahr. Damit das gescannte Bild mit Sicherheit flimmer- bzw. ruckelfrei ist, wird eine Bildfrequenz von ca. 100 Hz gewählt. Es gibt zwei Möglichkeiten ein Bild zu scannen. Die erste Variante ist, die Bildinformation nur in einer Scanrichtung zu projizieren (z. B. Scan von links nach rechts). Bei der zweiten Möglichkeit erfolgt die Bilddarstellung sowohl bei der Hin- als auch bei der Rückbewegung des Scanners. Durch einen bidirektionalen Scan könnte die Schwingfrequenz des Galvos bei gleicher Bildfrequenz halbiert oder bei gleichem Schwingverhalten des Galvos die Bildfrequenz verdoppelt werden. Nachteil eines solchen Scans wäre jedoch, dass die Informationen, die der SLM beim Scan liefert, in den beiden Scanrichtungen gerade umgekehrt werden müssen. Das macht die Datenverarbeitung und -übertragung aufwendiger. Daher wird für den Aussteller ein unidirektionaler Scan angewendet.

Um eine lineare Scanbewegung des spannungsgesteuerten Galvoscanners zu erreichen, wird eine Dreiecksspannung mit einstellbarer Frequenz und Amplitude als Steuerungssignal für den Scanner benötigt. Darüber hinaus muss die benutzte Spannung auch im Duty-Cycle<sup>13</sup> einstellbar sein. Damit kann bei einem unidirektionalen Scan erreicht werden, dass der Scanner eine schnelle Rückbewegung macht.

<sup>13</sup> Duty-Cycle = Tastgrad; Verhältnis zwischen positiver und negativer Impulsdauer einer Spannung, Angabe zwischen 0 und 1 oder 0 % bis 100 %

Die Schaltung zur Generierung des Spannungsverlaufs für die Steuerung des Scanners ist in Abb. 4.3 dargestellt und besitzt folgende Hauptbestandteile:

- 1 Maxim max038 Funktionsgenerator
- 2 Jumper JP1 zur Wahl der Signalform
- 3 Potenziometer zur Frequenz-Grobeinstellung
- 4 Jumper JP2 zur Parameterwahl der Frequenz-Fein- und Duty-Cycle-Einstellung
- 5 Potenziometer zur Frequenz-Fein- und Duty-Cycle-Einstellung
- 6 Verstärkerstufe mit Amplitudeneinstellung
- 7 Komparator zur Positionsdetektion des Scanners
- 8 Pin2 Scanner + Clock

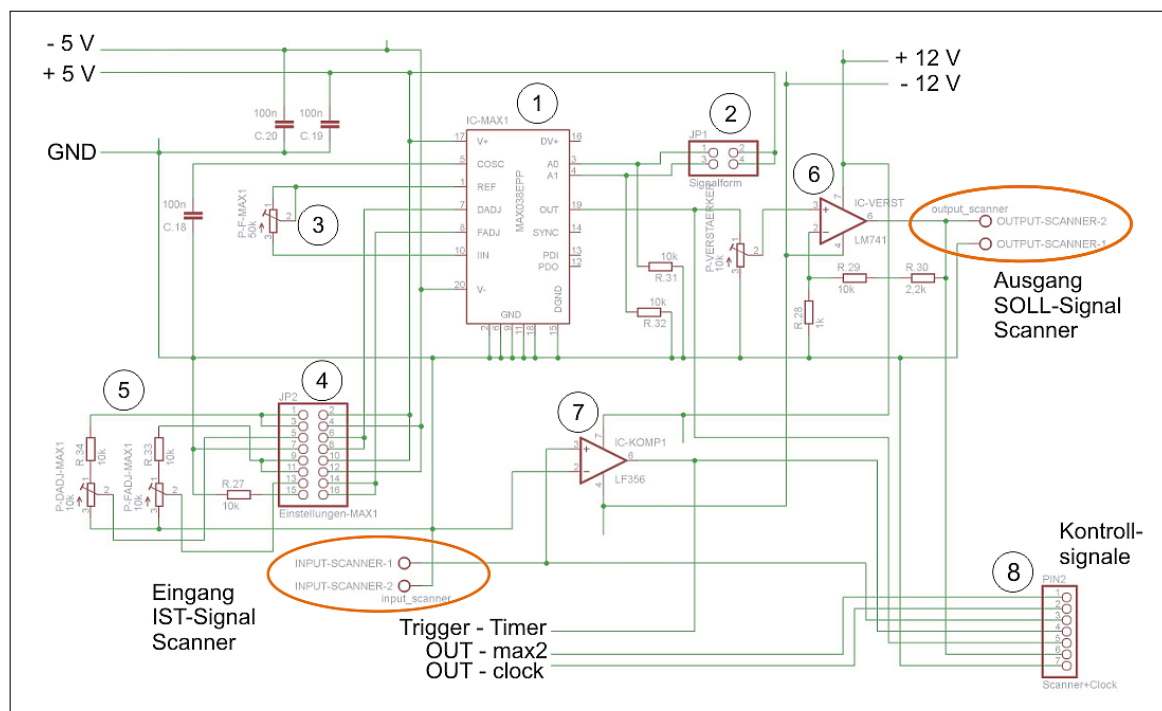


Abbildung 4.3: Schaltung Scanner-Steuerung

Da es für den Aussteller nicht notwendig ist, einen voll funktionsfähigen Funktionsgenerator, wie er z.B. im Labor verwendet wird, einzusetzen, musste dafür eine Alternative gefunden werden. Grundlegende Komponente dafür ist ein IC<sup>14</sup>, welcher mit einer minimalen Beschaltung genau den Funktionsumfang schafft, der für die Scannersteuerung benötigt wird. Für diesen Zweck wird der Schaltkreis max038 [12] der Firma Maxim verwendet. Dieser ist im Schaltplan mit 1 markiert. Es handelt sich bei diesem Bauelement um einen Hochfrequenz-Präzisions-Signal-Generator, welcher Spannungsverläufe in Sinus-, Rechteck- oder Dreiecksform im Frequenzbereich zwischen 0,1 Hz und 20 MHz liefern kann.

<sup>14</sup> IC = integrierte Schaltung, engl.: integrated circuit

Mit der Beschaltung des Bauelements sind folgende Funktionen gewährleistet:

- Wahl der Signalform
- Frequenzeinstellung
- Feineinstellung der Frequenz
- Einstellung des Duty-Cycle
- Amplitudenvariation

Die Wahl der Signalform erfolgt über zwei Eingänge des IC. Mit Hilfe des Jumpers JP1 lässt sich einzeln wählen, ob die Eingänge auf 5 V oder über 10-k $\Omega$ -Widerstände auf Masse liegen. Tabelle 4.3 zeigt die verschiedenen Steckvarianten des Jumpers, um die Signalformen auszuwählen. Das Zeichen –/– bedeutet dabei, dass kein Jumper gesteckt ist. Für die Verwendung im Aussteller ist der Jumper auf Position 1 zu stecken, da für den Betrieb eine Dreiecksspannung notwendig ist.

gesteckte Position	Funktion
1	Dreiecksspannung
2	Sinusspannung
–/–	Rechteckspannung

Tabelle 4.3: JP1 Signalform

Um die Schwingfrequenz des Scanners anzupassen, bietet der IC max038 eine Grob- und Feineinstellung der Frequenz. Die Grobeinstellung erfolgt dabei über einen Kondensator und einen Widerstand. Der Kondensator C.18 besitzt einen festen Wert von 100 nF und der Widerstand ist über ein 50-k $\Omega$ -Potenziometer realisiert. Die Feineinstellung der Frequenz erfolgt ebenfalls über ein Potenziometer. Alle Variationen der Frequenzfeineinstellung und der Wahl des Duty-Cycles können über die Jumperreihe JP2 durchgeführt werden. Tabelle 4.4 zeigt, welchen Einfluss die Wahl der einzelnen Jumperpositionen auf die Eigenschaften und Einstellmöglichkeiten des Spannungsverlaufes hat. Es gibt dabei die Möglichkeit, das Potenziometer P-FADJ<sup>15</sup>-MAX1 zur Feineinstellung zu nutzen oder auch außer Kraft zu setzen. Dies erfolgt über den entsprechenden Jumper in der Jumperleiste JP2. Es gibt die Möglichkeit der Frequenzregelung zu höheren oder niedrigeren Frequenzen. Die Wahl der Richtung erfolgt ebenfalls über einen Jumper in JP2.

Die Jumperleiste JP2 besitzt noch weitere Steckmöglichkeiten, welche das Einstellen des Duty-Cycle des Spannungsverlaufes ermöglichen. Der Duty-Cycle ist das Verhältnis zwischen der Zeit, die der Spannungsverlauf in positiven Spannungswerten überstreicht, und der Zeit mit negativen Spannungswerten. Diese Variation ist notwendig, um über die Möglichkeit eines unidirektionalen Scans mit schnellem Rücklauf zu verfügen. Es

<sup>15</sup> FADJ = frequency adjustment

kann gewählt werden, ob der Duty-Cycle ausgehend vom Standardwert 50 %, im ungenutzten Zustand, zu höheren oder niedrigeren Werten verstellt oder die Funktion des Potenziometers P-DADJ<sup>16</sup>-MAX1 außer Kraft gesetzt wird.

gesteckte Position	Funktion
1	Versorgung Poti <sup>17</sup> P-DADJ mit + 5 V → Duty-Cycle > 50 %
2	Versorgung Poti P-DADJ mit - 5 V → Duty-Cycle < 50 %
3	Poti P-DADJ in Betrieb
4	Poti P-DADJ außer Betrieb → Duty-Cycle = 50 %
5	Versorgung Poti P-FADJ mit + 5 V → $f < f_0$
6	Versorgung Poti P-FADJ mit - 5 V → $f > f_0$
7	Poti P-FADJ in Betrieb
8	Poti P-FADJ außer Betrieb → $f = f_0$

Tabelle 4.4: JP2 Einstellungen max1

Die Amplitude des Ausgangssignals legt in Verbindung mit dem Potenziometer „Size“ des Scannertreibers den Maximalausschlag des Scannerspiegels und somit den überfahrenen Scanwinkel fest. Hierbei erfolgt eine Skalierung des mechanischen Winkels des Scanners proportional zum angelegten Spannungssignal. Der Skalierungsfaktor zwischen Winkel und Spannung kann über das Potenziometer „Size“ in der Treiberschaltung des Scanners eingestellt werden. Für eine Bewegung von z. B.  $\pm 10^\circ$  mechanisch bzw.  $\pm 20^\circ$  optisch wird z. B. eine Spannung von  $\pm 10\text{ V}$  benötigt.

Die Verwirklichung einer einstellbaren Amplitude erfolgt in der Schaltung über eine Verstärkerschaltung mit einem OPV<sup>18</sup>. Der max038 liefert maximal einen Spannungsverlauf mit einer Amplitude von  $\hat{V}_{pp} = 2\text{ V}$ . Dies ist für das Eingangssignal des Scannertreibers zu gering. Der OPV arbeitet im hier dargestellten Fall als nichtinvertierender Verstärker nach einer Grundschialtung wie in Abb. 4.4.

$$U_a = V \cdot U_e \quad (4.1)$$

$$V = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (4.2)$$

$U_e$  : Eingangsspannung

$U_a$  : Ausgangsspannung

$V$  : Verstärkungsfaktor

<sup>16</sup> DADJ = duty cycle adjustment

<sup>18</sup> OPV = Operationsverstärker

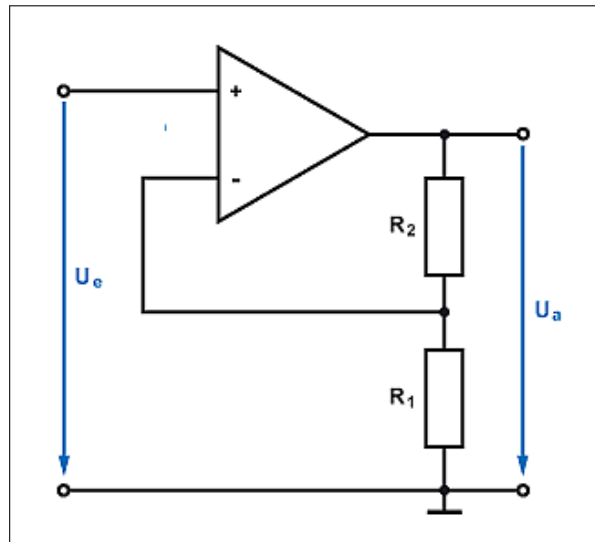


Abbildung 4.4: Grundsaltung eines OPV als nichtinvertierender Verstärker [9]

Als OPV wird der Mehrzweck-OPV LM741 verwendet. Die Verstärkung des OPV ist durch die Gegenkopplung mit  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$  und  $R_2 = 12,2\text{ k}\Omega$  laut Formel 4.2 auf ca. 13-fach eingestellt. Durch die Verstärkung des Ausgangs des max038 können Spannungsverläufe mit bis zu  $\pm 13\text{ V}$  erreicht werden. Das ist ausreichend, da der Eingang des Scannertreibers höchstens mit bis zu  $\pm 10\text{ V}$  gespeist werden darf.

Würde nur der OPV als Verstärker benutzt, ergäbe sich noch nicht eine einstellbare Amplitude, sondern nur ein um den Faktor 13 verstärktes Ausgangssignal des Signal-IC. Die Einstellung der Amplitude erfolgt über das als Spannungsteiler arbeitende Potenziometer P-VERSTAERKER am nichtinvertierenden Eingang des OPV. Somit ist es möglich, am Ausgang der Schaltung (OUTPUT-SCANNER) einen Amplitudenbereich von 0 V bis maximal 13 V zu überstreichen.

Zusammenfassend haben die Potenziometer folgende Funktionen:

Potenziometer	Funktion
P-F-MAX1	Frequenzeinstellung
P-FADJ-MAX1	Feineinstellung der Frequenz
P-DADJ-MAX1	Einstellung des Duty-Cycles
P-VERSTAERKER	Amplitudeneinstellung

Tabelle 4.5: Potenziometer zur Einstellung des Scanverlaufs

Mit den benannten Potenziometern und Jumpers lassen sich alle notwendigen Parameter des Spannungsverlaufs, welcher den Scannertreiber speist, variieren und somit der Scanverlauf des Galvoscaners optimal auf die Anforderungen für die Projektion abstimmen.

Um jedoch die weiteren Komponenten (Laser und SLM-Bauelement inkl. Steuerungsboard) mit den zeitlichen Scanverlauf synchronisieren zu können, wird das Positionssignal der Closed-loop-Regelung des Scanners genutzt. Der Scanner arbeitet als Master-Einheit im Setup. Es ist zum Betrieb erforderlich, einmal pro Scanzzyklus die Position des Scannerspiegels zu ermitteln. Aufbauend auf diese Information werden der Rest der Elektronik und das Verhalten der übrigen Komponenten zeitlich aufeinander abstimmt.

Für die Positionsdetektion wird eine Komparatorschaltung verwendet, welche das analoge Positionssignal (IST-Signal) des Scanners zu festen Auslenkzuständen in digitale Flanken umwandelt. Dazu wird der OPV LF356 als Komparator ohne Hysterese verwendet. An den nichtinvertierenden Eingang wird das IST-Signal (Positionssignal) des Scanners angelegt und der andere Eingang mit Masse verbunden. Der OPV liefert am Ausgang ein Rechtecksignal, welches die Flanken immer genau an den Nulldurchgängen des Positionssignals des Scanners aufweist. Die Nulldurchgänge entsprechen dem Nullpunkt der Scanbewegung, welche der Galvoscaner ausführt (siehe Abb. 4.5). Die Flanken des Rechtecksignals, welches aus der Umwandlung des IST-Signals entsteht, werden im Weiteren zur Triggerung<sup>19</sup> der übrigen Komponenten genutzt. Abb. 4.5 zeigt das Positionssignal und das korrespondierende Triggersignal. Die Periodendauer beider Signale beträgt ca. 10,4 ms, was einer Scanfrequenz von rund 96 Hz entspricht. Die Abbildung zeigt den Verlauf für den verwendeten unidirektionalen Scan, d.h. im steigenden Verlauf wird das Bild projiziert und im Fallenden bewegt sich der Scanner ohne Bilddarstellung schnell zurück.

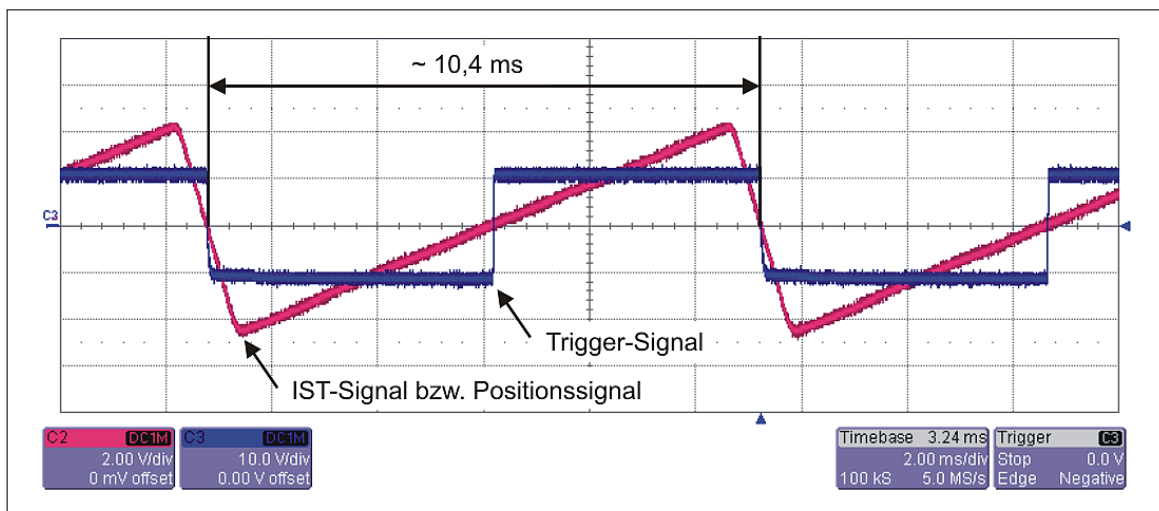


Abbildung 4.5: Positionssignal des Scanners und Triggersignal

Um den Verlauf des SOLL- und IST-Signals des Scanners und sowohl das Signal direkt am Ausgang des IC max038 als auch das durch den Komparator generierte Triggersignal zu überwachen oder zu Justagezwecken auswerten zu können, steht auf der Leiterplatte eine Reihe von Pins zu Verfügung. Tabelle 4.6 gibt eine Übersicht über die Pinbelegung und die anliegenden Signale. Die Signale OUT-max2 und OUT-clock werden gesondert

<sup>19</sup> Triggerung = Auslösen eines anschließenden Vorgangs



im Abschnitt „4.2.3 Taktgenerator“ auf Seite 36 erläutert, sind jedoch mit in dieser Pinreihe abgreifbar.

Position	Bezeichnung	Funktion
1	OUT-max 2	Ausgangssignal des Taktgenerators max2
2	OUT-clock	Aufbereitetes Taktsignal fürs Board
3	IN-Scanner	IST-Signal bzw. Positionssignal des Scanners
4	Trigger-Timer	Triggersignal für Timing-Schaltung
5	OUT-max1	Ausgangssignal des Funktionsgenerators max1
6	OUT-Scanner	SOLL-Signal für Scanner
7	GND	Masse

Tabelle 4.6: Pin2 Scanner + Clock

## 4.2.2 Timing-Schaltung

Dieser Teil der Elektronik ist für das zeitliche Zusammenspiel der Komponenten zuständig. Abb. 4.6 zeigt den grundlegenden Ablauf eines unidirektionalen Scans. Ausgehend von der Master-Einheit für das Timing, dem Scanner, werden alle anderen Vorgänge gesteuert. Ausgangspunkt für das Timing ist das schon im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Positionssignal des Scanners (gelbes Signal) und das daraus erzeugte Triggersignal für die Timing-Schaltung. Im Weiteren soll beschrieben werden, wie alle notwendigen Signale für die Komponenten Laser und Steuerungsboard erzeugt werden.

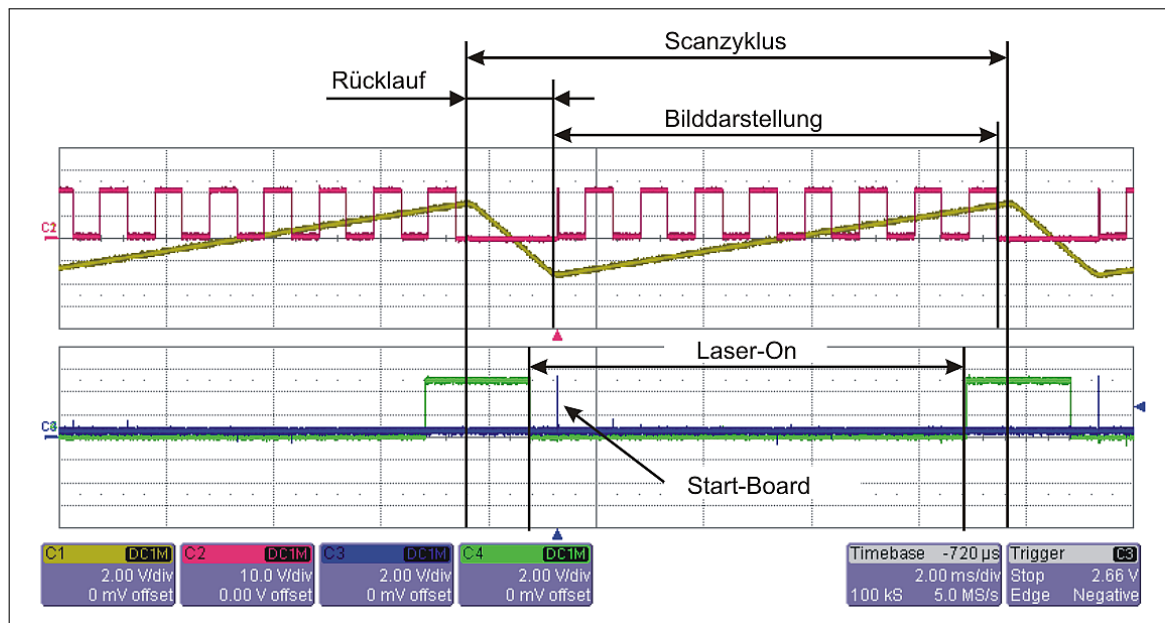


Abbildung 4.6: Übersicht Scanzzyklus

Abb. 4.6 zeigt im oberen Teil den Spannungsverlauf an einem Kanal des Steuerungsboards des SLM (rotes Signal). Das ist die Zeit, in der ein Bild auf dem Schirm projiziert wird. Im unteren Teil des Bildes sind die Steuerungssignale für Board und Laser aufgetragen. Das blaue Signal mit den kurzen Peaks ist das Startsignal für das Board. Dieses Signal ist ca.  $10\ \mu s$  lang und dient dazu, dem Board einen Startimpuls zur Bilddarstellung zu geben. Das Signal bewirkt, dass ein Einschreibzyklus des entsprechenden Bildes auf den SLM gestartet wird. Das letzte hier zu erwähnende Signal (grün) ist das Modulationssignal Laser-On. Der Laser ist an, wenn das Signal auf Masse liegt und aus, wenn das Signal auf 5-V-Pegel liegt. Die Schaltung gewährleistet, dass der Laser genau in der Zeit an ist, wenn dem Strahl durch den SLM Informationen aufgeprägt werden und so ein Bild dargestellt wird. Im Diagramm ist erkennbar, dass der Laser schon vor dem Anfang bzw. dem Ende der Bilddarstellung geschaltet wird. Das liegt an der für den Lasertyp charakteristischen Einschalt- bzw. Ausschaltverzögerung des Lasers. Dieser Effekt kann zum Teil durch ein geeignetes Timing kompensiert werden.

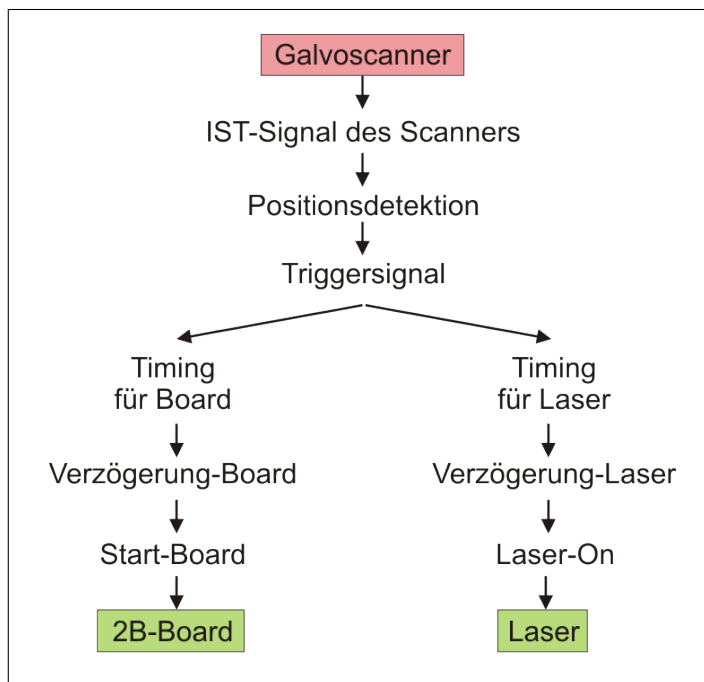


Abbildung 4.7: Timingablauf

Wie schon angedeutet, lässt sich das Timing in ein Glied für das Board und ein Glied für den Laser unterteilen. Abb. 4.7 zeigt diesen Sachverhalt. Erster Bestandteil von beiden Strängen ist eine Verzögerung zwischen der fallenden Flanke des Triggersignals und dem Start des eigentlichen Signals für die jeweilige Komponente. Die einstellbare Verzögerung stellt sicher, dass die Steuerungssignale zum richtigen Zeitpunkt im Scanzzyklus an die jeweilige Komponente gesendet werden. Diese Verzögerung ist zwingend notwendig, da der Trigger durch die fallende Flanke des Triggersignals gerade im Nullpunkt der Rückbewegung des Scanners kommt und somit nicht direkt zur Synchronisation der anderen Bestandteile genutzt werden kann. Im zweiten Schritt wird dann das passende Steuerungssignal für Board oder Laser generiert. Als bestimmendes elektronisches

Bauteil für die zeitliche Steuerung des Ausstellers kommt der Timer-IC 555 zum Einsatz. Dieser Timer ist ein Schaltkreis zur stabilen und hochgenauen Erzeugung von zeitlichen Verzögerungen oder Oszillationen. Die Steuerung der Zeiten bzw. die externe Beschaltung erfolgt lediglich durch ein oder zwei Widerstände und einen Kondensator. Die interne Arbeitsweise sowie Pinbelegung etc. lässt sich dem Datenblatt [11] des Timers entnehmen. Abb. 4.8 zeigt die grundsätzliche Beschaltung des Timers für den monostabilen Betrieb. Alle Schaltkreise des Typs 555 werden mit einer Betriebsspannung von  $V_{CC} = 12\text{ V}$  betrieben. Die Länge des erzeugten Impulses wird durch den Widerstand  $R_1$  und den Kondensator  $C_1$  bestimmt.

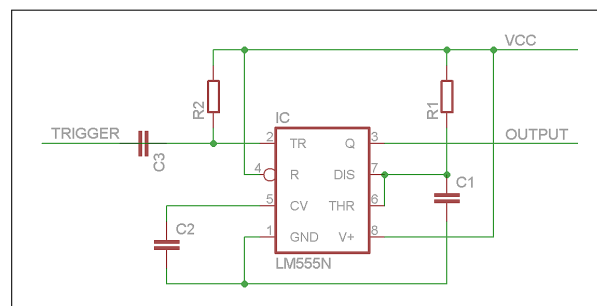


Abbildung 4.8: Beschaltung des Timer 555 für monostabilen Betrieb

Den Kern der Timingschaltung, wie sie in Abb. 4.9 dargestellt ist, bilden vier der Timer-ICs, jeweils zwei für die Synchronisation des Steuerboards und des Lasers. Die vier Bauelemente haben folgende Funktionen:

**Timer 1:** einstellbare Verzögerung bis zum Startsignal ans Steuerboard

**Timer 2:** einstellbare Verzögerung bis der Laser angeht

**Timer 3:** Generierung des Startsignals für das Board

**Timer 4:** einstellbares Modulationssignal für den Laser

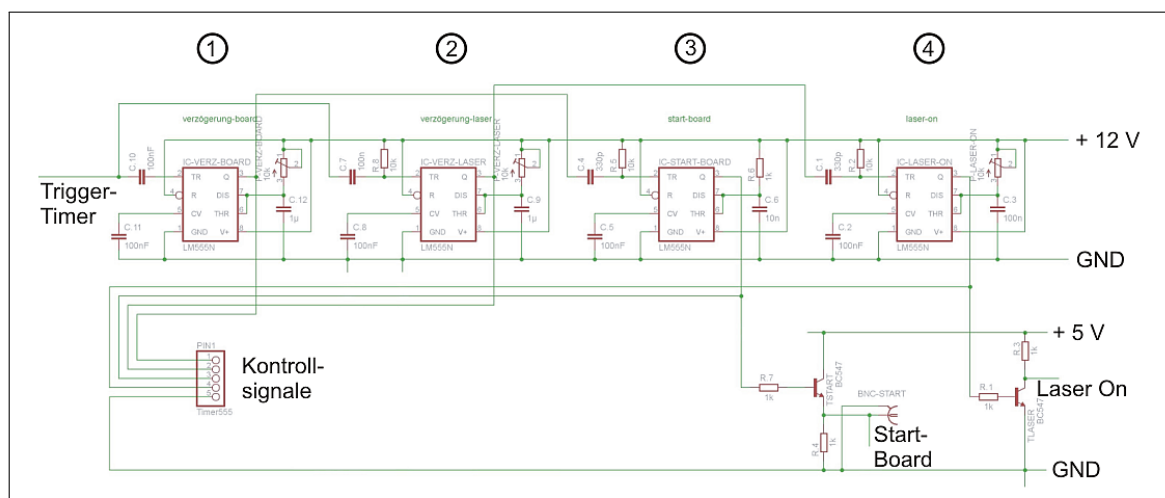


Abbildung 4.9: Schaltung Timingteil

Die Timer 1, 2 und 4 verfügen dazu über variierbare Impulsdauern. Dies wird durch  $10\text{-k}\Omega$ -Potenziometer in der Funktion von  $R_1$  (Abb. 4.8) realisiert. In Kombination mit einem Kondensator von  $1\text{ }\mu\text{F}$  lassen sich damit Verzögerungen bis zu  $11\text{ ms}$  erzeugen. Dies gibt die Freiheit, bei der angestrebten Scanfrequenz von  $100\text{ Hz}$  eine ganze Periode zu überstreichen. Timer 3 hingegen arbeitet mit festen Werten für die Bauelemente, welche die Impulsdauer bestimmen. Das ist ausreichend, da dem Board ein Startimpuls mit einer festen Dauer von  $> 10\text{ }\mu\text{s}$  genügt. Der Kondensator hat eine Kapazität von  $10\text{ nF}$  und der Widerstand besitzt  $1\text{ k}\Omega$ .

Abb. 4.10 und 4.11 zeigen die prinzipiellen Verläufe der Timingsignale für das Board und den Laser. Wie erwähnt, ist die Verzögerung von Triggersignal bis zum Startsignal ans Board einstellbar (Potenziometer P-VERZ-BOARD) und muss so gewählt werden, dass die Bilddarstellung bzw. das Schreiben von Informationen durch den Lichtmodulator am Anfang des Scans in Projektionsrichtung erfolgt. Das stellt sicher, dass der Scanwinkel möglichst effektiv ausgenutzt wird und ein entsprechend großes Bild geschrieben werden kann. Die Dauer der Bilddarstellung wird jedoch durch den Arbeitstakt des Boards bestimmt. Dieser kann mit Hilfe des Taktgenerators (siehe „4.2.3 Taktgenerator“) durch ein Potenziometer eingestellt werden. So lässt sich der eingestellte Scanwinkel effektiv ausnutzen. Durch den Betrieb der Timer mit  $12\text{ V}$  haben auch die Ausgangsimpulse eine Amplitude von ca.  $12\text{ V}$ . Dieser Pegel ist jedoch zu hoch, um als Startsignal für das Board zu dienen. Um das Startsignal auf einen akzeptablen  $5\text{-V}$ -Pegel zu transformieren, wird mit einem Transistor des Typs BC547 immer wenn das Startsignal vom Timer kommt zeitgleich eine Spannung von  $5\text{ V}$  geschaltet. Durch diese Schaltung entsteht ein Startsignal mit  $5\text{ V}$ , welches dem Ausgang des Timers 3 folgt.

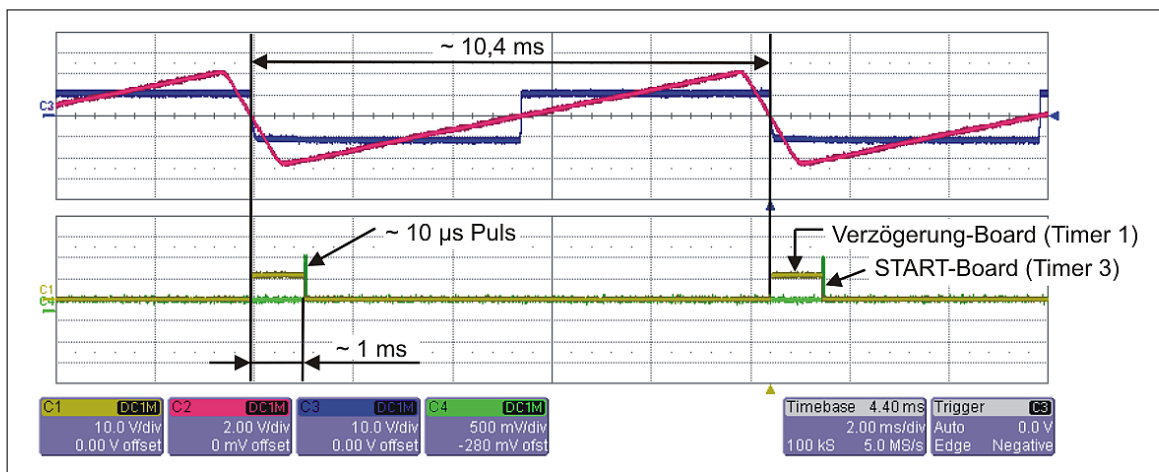


Abbildung 4.10: Signalverlauf Boardsynchronisation

Die Verzögerung im Zweig der Lasersynchronisation hat die Aufgabe, den Laser dann einzuschalten, wenn die Bilddarstellung beginnt. Dabei ist zu beachten, dass der Laser erstens eine Einschalt- und Ausschaltverzögerung hat, was zur Folge hat, dass der Laser etwas früher als zum Anfang oder Ende der Bilddarstellung geschaltet werden muss. Zweitens gibt der Laser nicht sofort nach dem Einschalten seine volle Leistung ab.

Er regelt seine Leistung kontinuierlich nach oben bis zur Maximalleistung. Dieser Effekt ist an einem stetigen Helligkeitsübergang im gescannten Bild erkennbar. Die Verzögerung muss mit dem Potenziometer P-VERZ-Laser so eingestellt werden, dass sowohl die Einschaltverzögerung als auch dieses langsame Hochfahren der Leistung nicht in den Bereich der Projektion fallen. Als Zweites muss mit Timer 4 ein Impuls erzeugt werden, der so lange dauert, wie der Laser zur Projektion an sein soll. Auch hier ist wieder das Schaltverhalten des Lasers zu beachten. Weiterhin muss das Signal, welches der Timer zur Lasermodulation ausgibt, invertiert und an den 5-V-Pegel des Lasers angepasst werden. Der Timer generiert während der Phase, in welcher der Laser an ist, einen High-Pegel und sonst einen Low-Pegel. Die Modulation des Lasers ist jedoch so gestaltet, dass der Laser an ist, wenn der Eingang mit Masse verbunden ist und aus ist, wenn 5 V am Eingang liegen. Dies ist der Grund der Invertierung. Auch dies geschieht wieder mit einem Transistor BC 457.

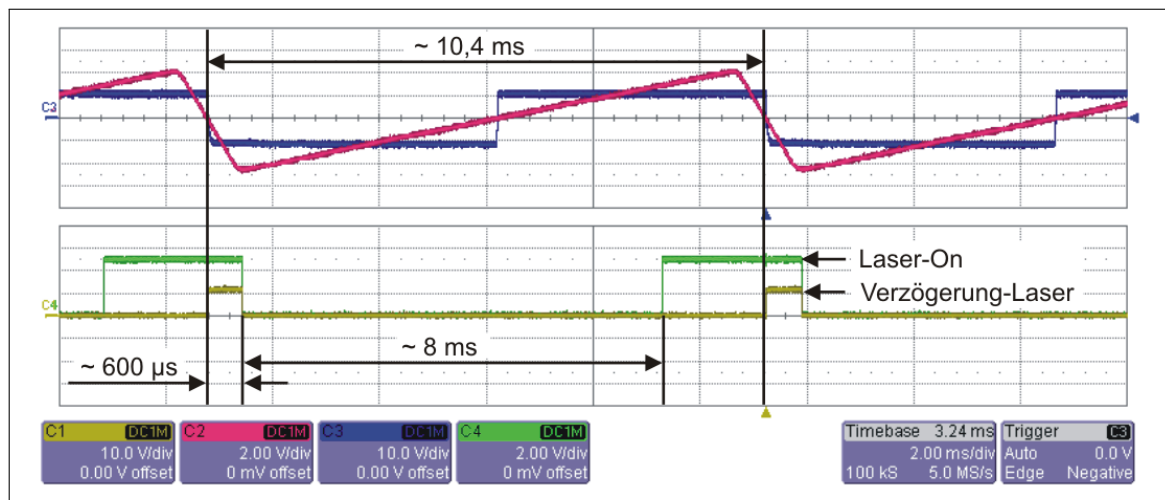


Abbildung 4.11: Signalverlauf Lasersynchronisation

Der komplette Scanzzyklus ist ein Zusammenspiel aus der Scannersteuerung, der Positionsdetektion und dem Timing von Board und Laser. Dies ist nochmals in Abb. 4.12 zusammengefasst. In Tabelle 4.7 sind die drei Potenziometer, welche zum Einstellen des Timings dienen, zusammenfassend aufgeführt.

Potenziometer	Funktion
P-VERZ-BOARD	Einstellung der Verzögerung bis zum Startsignal ans Steuerungsboard
P-VERZ-LASER	Einstellung der Verzögerung bis Laser an sein darf
P-LASER-ON	Einstellung der Dauer der Laseremission

Tabelle 4.7: Potenziometer zur Einstellung des Timings

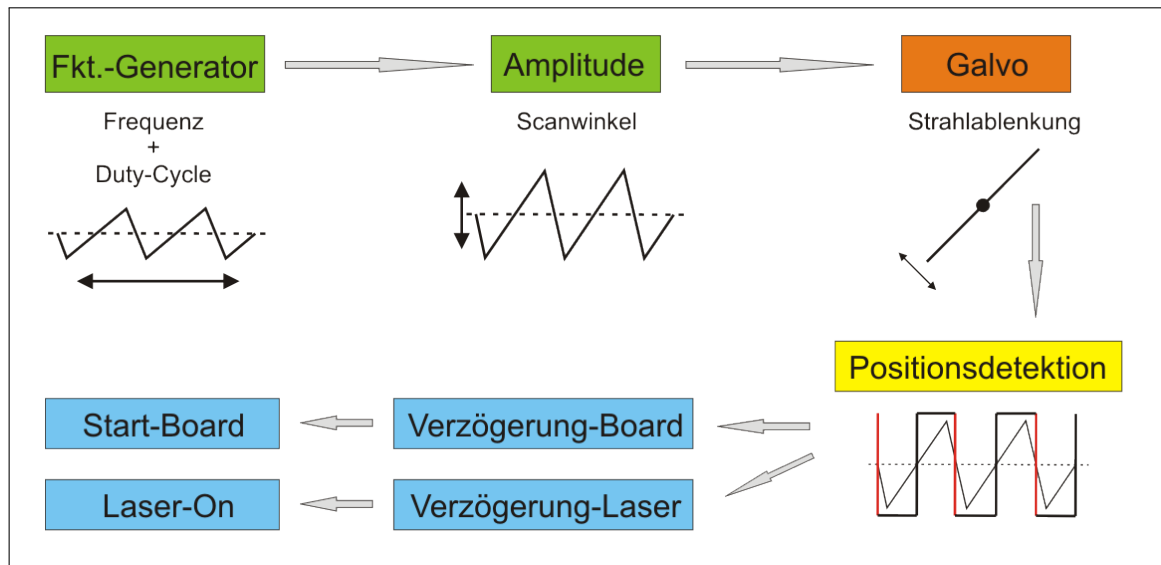


Abbildung 4.12: Übersicht Scannersteuerung und Timing

Analog zum Elektronikteil für die Scannersteuerung gibt es auch zu dem hier behandelten Teil eine Pinreihe zum Abgriff und zur Kontrolle der verwendeten Signale. Tabelle 4.8 gibt eine Übersicht über Pin1 Timer 555. Zu erwähnen ist noch, dass sich die auf 5-V-Pegel transformierten Signale für Board und Laser nicht auf diesen Pins finden lassen, sondern sich auf der Pinreihe Pin3 Synchronisation + Sicherheit befinden.

Position	Bezeichnung	Funktion
1	Verzögerung Board	Schaltverzögerung zwischen Triggersignal und Startsignal für 2B-Board
2	Verzögerung Laser	Verzögerung zwischen Triggersignal und Einschalten des Lasers
3	Start Board 555	Startsignal für Board (direkt am Timer, 12 V)
4	Laser On 555	Lasermodulationssignal (direkt am Timer, 12 V)
5	GND	Masse

Tabelle 4.8: Pin1 Timer 555

### 4.2.3 Taktgenerator

Aufgabe des Taktgenerators ist es, das Steuerungsboard des SLM herunterzutakten. Das ist notwendig, um die Bilddarstellungsgeschwindigkeit an das Scanverhalten anzupassen. Alle Funktionen des Boards sind taktgesteuert, dies erfolgt im Freilauf mit einem Onboard-Takt von 40 MHz. Das Board verfügt jedoch über einen Clock-Eingang, mit dessen Hilfe es langsamer getaktet werden kann. D.h. die Ansteuerung der Makropixel des SLM und somit auch die Bilddarstellung für die Projektion können langsamer erfolgen. Das ist wesentlich, da beim Onboard-Taktbetrieb der SLM die Bilder mit einer Frequenz von

2 kHz dargestellt würde. Diese Geschwindigkeit ist für das menschliche Auge unnötig um ein gutes Bild wahrzunehmen. Eine weitere Tatsache ist, dass der Scanner bei einer so hohen Boardfrequenz eine viel höhere Ablenkfrequenz schaffen müsste. Das ist mit dem benutzten Scanner nicht möglich. Für die angestrebte Bildfrequenz von ca. 100 Hz wird ein Taktsignal von 2 – 3 MHz benötigt. Die Grundlage zur Erzeugung eines solchen Taktsignals liefert der IC max038.

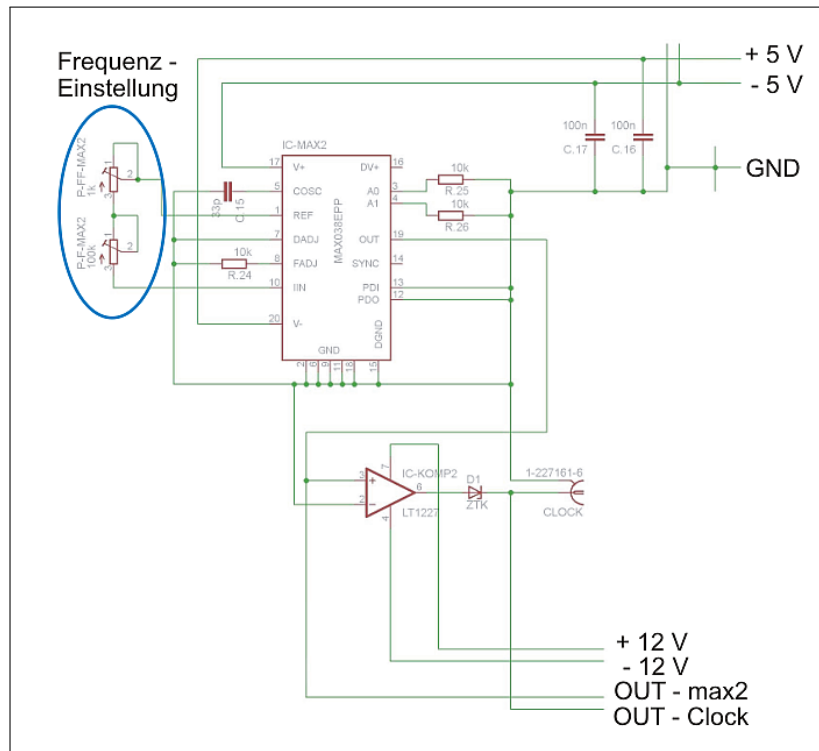


Abbildung 4.13: Schaltung Taktgenerator

Die Schaltung, welche in Abb. 4.13 dargestellt ist, ähnelt der Schaltung für die Scannersteuerung. Es sind aber einige Vereinfachungen getroffen und Teile, die für den Taktgenerator nicht nötig sind, weggelassen worden. Unterschiede in der Beschaltung des max038 gegenüber der Steuerungsschaltung für den Scanner liegen in folgenden Punkten:

- Feste Signalform → Rechteck; Eingänge mit jeweils 10 kΩ auf GND
- Zwei in Reihe geschaltete Potenziometer zur Frequenzeinstellung
- keine Frequenzfeineinstellung über FADJ
- keine Einstellung des Duty-Cycles

Für den benötigten Taktgenerator reicht eine minimale Beschaltung des Bauelements aus, denn es wird nur ein Rechtecksignal mit 50 % Duty-Cycle, fester Amplitude und ausreichend genau einstellbarer Frequenz benötigt. Die Einstellung der Frequenz erfolgt für das Taktsignal diesmal mit zwei Potenziometern in Reihe, einem mit 100 kΩ und einem mit 1 kΩ. Dadurch wird erreicht, dass der Widerstand, welcher die Frequenz bestimmt,

relativ fein einstellbar ist und somit auf die Möglichkeit der Frequenzfeineinstellung verzichtet werden kann.

Im gewünschten Frequenzbereich von  $2 - 3 \text{ MHz}$  liefert der max038 nicht mehr gute Rechteckverläufe, sondern es wird ein verzerrtes Rechtecksignal erzeugt. Außerdem würde die Amplitude des Signals von gerade mal ca.  $1 \text{ V}$  nicht ausreichen, um das Board zu takten. Der Clock-Eingang des Boards benötigt mindestens eine Amplitude von  $3,3 \text{ V}$  (maximal  $5 \text{ V}$ ), um das Taktsignal als solches zu registrieren. Die Nachteile des schlechten Signalverlaufs bei hohen Frequenzen und die unzureichende Amplitude können mit einem einzigen Bauelement behoben werden.

Dies geschieht mit einem weiteren OPV. Dieser muss mit den Frequenzen oberhalb von  $2 \text{ MHz}$  arbeiten können, und deshalb wird der  $140 \text{ MHz}$  Video OPV LT1227 verwendet. Die Beschaltung erfolgt in der Grundsaltung eines Komparators. Das Ergebnis am Ausgang des OPV ist dann ein Rechtecksignal mit den Flanken an den Nulldurchgängen des verfälschten Rechtecksignals, welches der max038 erzeugt. Mit dem Video-OPV kann der Kurvenverlauf des Taktsignals verbessert werden. Weiterhin ist es möglich, die Amplitude des Taktsignals durch den OPV auf  $V_{pp} \approx \pm 5 \text{ V}$  zu erhöhen. Der letzte Schritt in der Generierung des Taktsignals ist eine Gleichrichtung. Es kommt eine Einweggleichrichtung mit einer Diode zur Anwendung. Das Ergebnis ist ein gleichförmiges Rechtecksignal mit einer Amplitude von  $\hat{V} = 5 \text{ V}$ . Mit dem erzeugten Taktsignal ist es möglich, das Board mit Frequenzen im Bereich  $0,5 - 4 \text{ MHz}$  zu takten und so die Bilddarstellung an den Scanzyklus anzupassen.

Für die Kontrolle der Signale direkt am IC max038 und des aufbereiteten Signals für das Board stehen die entsprechenden Pins am Pin2 Scanner + Clock zu Verfügung (siehe Seite 31).

Eine Gesamtübersicht aller Potenziometer und Signale für die möglichen Einstellungen und die entsprechenden Positionen im Elektroniklayout können der Anleitung des Ausstellers entnommen werden.



## 5 Lasersicherheit

Beim Umgang mit Laserstrahlung ist stets auf erhöhte Sicherheit zu achten. Besonders bei einem Messeaussteller, welcher aufgrund seiner Bestimmung ständig von vielen Menschen umgeben ist, sind bestimmte Maßnahmen zu treffen, damit niemand gefährdet wird. Da das eingesetzte Lasermodule mit 10 *mW* optischer Leistung vom Hersteller der Laserklasse 3B zugeordnet wurde, soll in diesem Kapitel beschrieben werden, was getan werden muss, um die Lasersicherheit des Gerätes zu gewährleisten.

Die Maßnahmen zur Lasersicherheit werden unterteilt in eine mechanische Abschottung und eine elektronische Sicherheitsschaltung. Der mechanische Teil, insbesondere das Gehäuse, wird so gestaltet, dass der Bediener oder Betrachter nicht mit Teilen des Strahlengangs in Berührung kommen kann, die ihm gesundheitlich gefährlich werden können.

Im Design des Ausstellers gibt es lediglich eine Strahlaustrittsöffnung, aus welcher der Laserstrahl aus dem Gehäuse austritt. Dort ist dieser durch Aufweitung und den Scan in seiner Intensität so geschwächt, dass die Lasersicherheit der Personen im Umfeld sichergestellt wird. Die Ausführung des Gehäuses und der Strahlaustrittsöffnung wird im Kapitel „7 Gehäuse“ ab Seite 57 beschrieben. Ein Eingriff in die Einhausung des Ausstellers ist nur mit Werkzeug möglich. Zusätzlich ist am Gehäuse ein Interlock implementiert, der den Laser bei Abnahme der Abdeckung ausschaltet.

Folgende Ereignisse führen zur Abschaltung des Lasers:

1. Öffnen der Geräteabdeckung
2. Entfernen des Projektionsschirms
3. Zu klein oder zu langsam gescanntes Bild
4. Stehender Projektionsstreifen

Sowohl das Öffnen des Gehäuses als auch das Entfernen des Projektionsschirms werden über mechanische Schalter registriert und führen zur Abschaltung des Lasers. Weitaus gefährlicher wäre es, wenn die Steuerungselektronik des Scanners oder der Scanner eine Fehlfunktion aufweisen würde. Dies hätte Ereignisse 3. + 4. zur Folge. Beide Gegebenheiten, zu klein bzw. zu langsam gescanntes Bild oder ein stehender Projektionsstreifen, könnten dazu führen, dass der Betrachter ernsthaft durch die Laserstrahlung geschädigt wird. Um diese Fehlerbilder zu kontrollieren, bietet der Hersteller der Scanners eine sogenannte Safety-Schaltung [10] an. Es handelt sich um eine mikroprozessorgesteuerte Bewegungsüberwachung des Galvoscaners. Zur Gewährleistung der Lasersicherheit wird dieses Safety-Modul im Aussteller auch verwendet. Das Modul wird einfach auf den

vorhandenen Scannertreiber aufgesteckt. Mit dieser zusätzlich eingebrachten Elektronik lässt sich folgende Funktionalität erzielen:

„Die Bewegungsüberwachung legt den zurückgelegten Weg der Scanner pro Zeiteinheit zugrunde. Dabei werden sowohl die Galvopositionen ausgewertet, als auch die zugehörigen Eingangssignale. Dadurch werden z.B. oszillierende Positionssignale infolge defekter Galvoelektronik nicht als Bewegung ausgewertet, weil immer auch das korrespondierende Eingangssignal mit überwacht wird. Scannerbewegung ausreichend, **wenn** sich (Eingangssignal X **und** Galvoposition X) **oder** (Eingangssignal Y **und** Galvoposition Y) **innerhalb** Zeit T um Wert n geändert haben. Die Zeit T ist festgelegt auf 25 Millisekunden. Der Bewegungswert n wird eingestellt mit dem Poti „Sensitivity“. Ein maximaler Wert bedeutet also maximale Empfindlichkeit (großer Weg muss zurückgelegt werden). Der minimale Wert bedeutet minimale Empfindlichkeit (kleiner Weg muss zurückgelegt werden).“ [10]

Das Modul verfügt über drei äquivalente Signalpfade, welche an Optokopplern liegen und bei einem Fehlerfall aufgrund einer Fehlfunktion des Scanners abgeschaltet werden. Die Abschaltschwelle kann dazu mit dem Sensitivity-Potenzimeter auf der Safety-Platine eingestellt werden. Als Grundlage für das Ansprechen der Signalpfade dient die Festlegung eines minimalen Scanwinkels, welcher gescannt werden muss, damit das Bild als sicher gilt.

Bei Eintritt von mindestens einem der vier Fehlerbilder wird der Laser umgehend ausgeschaltet. Es ist nicht sinnvoll, die Betriebsspannung des Lasers abzuschalten, da dies im wiederholten Falle zu Anormalitäten im Laserbetrieb führen könnte. Stattdessen wird das Modulationssignal des Lasers so modifiziert, dass der Laser einen sicheren Betriebszustand einnimmt, also keine Strahlung mehr emittiert. In der Sicherheitselektronik des Ausstellers ist dafür eine Reihe von Logikbauelementen vorgesehen. Damit werden die Fehlersignale überwacht und bei Störungen dementsprechend der Betriebszustand des Lasers geändert.

Signalkürzel	Bedeutung
S	Scanfehler
G	Gehäuse geöffnet
P	Projektionsschirm entfernt
F	Fehler gesamt
L	Laser-On
M	Laser-Modulation

Tabelle 5.1: Signale der Logikschaltung

Tabelle 5.1 zeigt alle Signale auf, welche durch den Logikteil der Ausstellerelektronik behandelt werden. Die Fehlereingänge bilden die Signale S, G und P. Sie werden

durch die benannten Fehlerquellen ausgelöst. Das Signal Fehler gesamt (F) ist ein Zwischensignal der Logikschaltung, welches widerspiegelt, ob mindestens einer der Fehlerindikatoren ausgelöst wurde. Darüber hinaus gibt es die Signale L und M, wobei Laser-On (L) das Modulationssignal für den Laser ist, welches durch den Timingteil der Schaltung erzeugt wird und im fehlerfreien Betrieb die Modulation des Lasers übernimmt. Laser-Modulation (M) ist das Signal, welches dann den Laser erreicht und zu dessen Modulation verwendet wird. Im Falle des Ansprechens der Safety-Schaltung erfolgt das Schalten des Signals über einen der erwähnten Optokoppler. Die beiden Signale G und P werden über konventionelle mechanische Schalter an Gehäuse und Schirm bedient. Im fehlerfreien Zustand sind alle Signale durchgeschaltet, d.h. es liegen 5-V-Pegel an, welche einem logischen High („1“) entsprechen. Wird mit einem der Signalgeber ein Fehler registriert, werden die Signalpfade unterbrochen und es liegt ein Pegel von 0 V (GND) auf der Leitung (logisch Low bzw. „0“). Die Signale, welche den Laser betreffen, sind High wenn der Laser aus ist und Low wenn der Laser in Betrieb ist.

Es lassen sich mit den beschriebenen Signalen verschiedene Fehlerszenarien konstruieren. Es ist klar, dass der Laser nur im Zustand, wenn keinerlei Fehler auftreten, in Betrieb sein darf. Tabelle 5.2 beinhaltet alle möglichen Kombinationen der Signale bzw. Variablen S, G, P und L und bildet damit die Wahrheitstabelle für die Logikschaltung. Markiert ist darin der einzige fehlerfreie Zustand ( $M = 0$ ) und nur dann ist der Laser eingeschaltet.

S	G	P	F	L	M
0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	1	1
0	0	1	0	0	1
0	0	1	0	1	1
0	1	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1
0	1	1	0	0	1
0	1	1	0	1	1
1	0	0	0	0	1
1	0	0	0	1	1
1	0	1	0	0	1
1	0	1	0	1	1
1	1	0	0	0	1
1	1	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	0	0

Tabelle 5.2: Schalttable der Logikschaltung

Gleichung 5.1 beschreibt die Schaltfunktion, welche die Logikbausteine realisieren müssen, um das Ergebnis, wie in der Wahrheitstabelle beschrieben, umzusetzen.

$$M = \overline{S \wedge G \wedge P} \vee L = \overline{F} \vee L \quad (5.1)$$

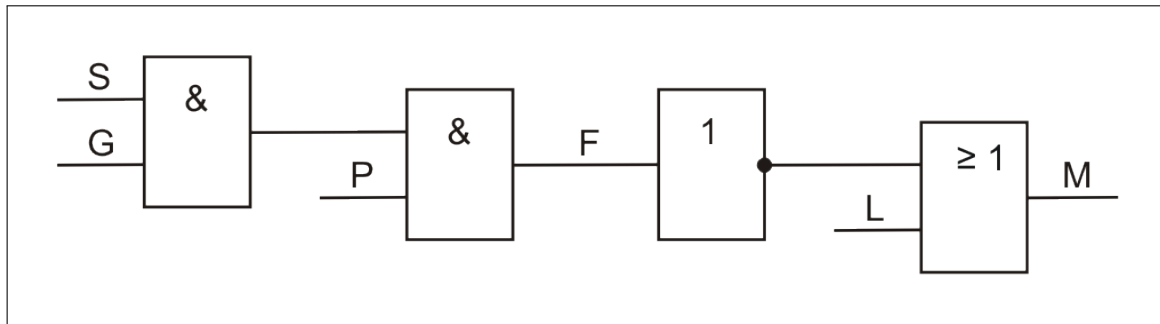


Abbildung 5.1: Blockschaltbild der logischen Verknüpfungen

Nummer	Verknüpfung	Bauelement	Funktion
1	AND	74HCT08	4-fach AND-Gatter mit je 2 Eingängen
2	NOT	74HCT04	6-fach Inverter
3	OR	74HCT32	4-fach OR-Gatter mit je 2 Eingängen

Tabelle 5.3: Verwendete Logikbauelemente

Es ist zu erkennen, dass für die Funktion der Sicherheitsschaltung nur vier logische Verknüpfungen benötigt werden: 2 x AND, 1 x NOT und 1 x OR. Abb. 5.1 zeigt die notwendige Zusammenschaltung der Logikbausteine als Blockschaltbild. In Tabelle 5.3 sind die Bauelemente vermerkt, welche benutzt werden, um die Schaltung aufzubauen.

Der Logikteil der Elektronik stellt sicher, dass beim Eintritt eines der beschriebenen Fehler der Laser keine Strahlung mehr emittiert und somit der Bediener und die Betrachter keiner Gefahr ausgesetzt werden. In der Abb. 5.2 wird das Verhalten der Schaltung schematisch dargestellt. Das obere Signal steht für die Modulation des Lasers, so wie er von der Timerschaltung generiert wird und im fehlerfreien Zustand an den Laser weitergeschaltet wird (Laser-On (L)). In der Mitte ist das Signal Fehler gesamt (F) aufgetragen. Es zeigt an, ob mindestens ein Fehler am Gerät aufgetreten ist. Sobald dies geschieht, wird das Modulationssignal des Lasers so verändert, dass der Laser keine Strahlung mehr emittiert. Das entstehende Signal ist das Dritte in der Abbildung, und stellt das Signal Laser-Modulation (M) dar.

Grundlegende Funktionsbauelemente des Logikteils der Schaltung (Abb. 5.3) sind die Logikbausteine 1, 2 und 3, welche nach Gleichung 5.1 verschaltet sind. Die Schaltung wurde so gestaltet, dass außer den Fehlersignalen S, G und P noch zwei weitere Fehlersignale (Fehler 4 und Fehler 5) behandelt werden können. Dies schafft Freiraum für eventuelle Erweiterungen. Die Einspeisung der Fehlersignale, außer dem Safety-Signal, erfolgt über die Anschlussklemmen, welche im oberen Teil des Schaltplans markiert sind. Die zwei Anschlussklemmen im unteren Teil des Schaltplans sind für das Fehlersignal der Safety-Schaltung und den Ausgang für die Lasermodulation vorgesehen.

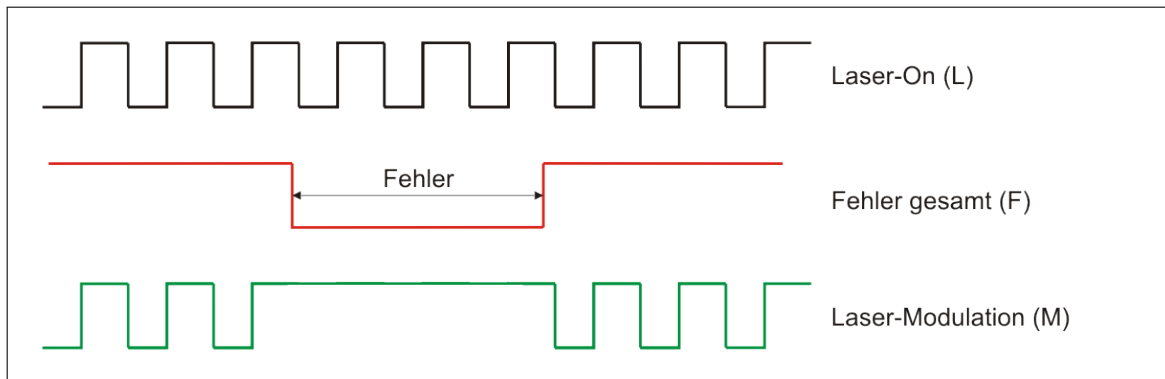


Abbildung 5.2: Schematischer Signalverlauf bei Eintritt einer Störung

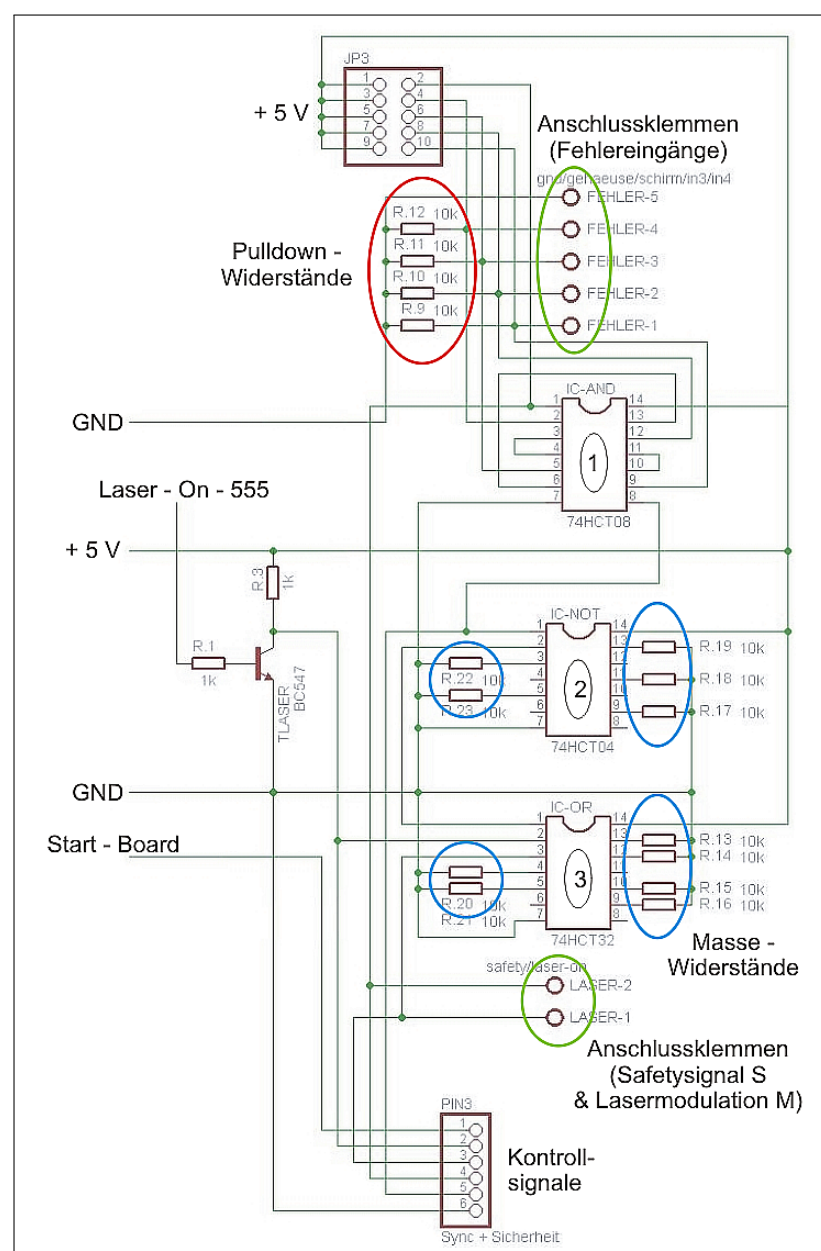


Abbildung 5.3: Logikteil der Steuerungsschaltung

Die Pulldown-Widerstände an den Logikbauelementen schalten alle nicht benutzten Eingänge definiert auf Masse. Dies vermeidet, dass die ICs ungewollt schwingen und undefinierte Zustände einnehmen. Das hätte einen erhöhten Stromverbrauch zur Folge, und die Behandlung der wichtigen Signale könnte beeinträchtigt werden. Die Widerstände an den Fehlereingängen dienen auch dazu, die Signale auf Masse zu ziehen, jedoch nur dann, wenn kein 5-V-Signal, d.h. fehlerfreier Zustand, auf den Leitungen übertragen wird. So wird sichergestellt, dass ein Fehler auch als solcher von der Logikschaltung detektiert wird. Der Pulldown-Widerstand für den Safetyeingang wurde weggelassen, da dieser schon an den Optokopplern des Safety-Moduls des Scanners integriert ist. Jeder der Fehlereingänge verfügt auch noch über einen Pullup-Widerstand. Dessen Funktion ist das Heraufziehen des Pegels auf 5 V, logisch High, und zwar dann, wenn der jeweilige Fehlereingang nicht genutzt wird. Würden die unbenutzten Eingänge offen liegen, käme es besonders durch die Pulldown-Widerstände, welche einen Low-Pegel erzeugen, automatisch zur Detektion einen Fehlers. Die Auswahl der unbenutzten Eingänge erfolgt über den Jumper J3, welcher je nach Position der Jumper die Eingänge als unbenutzt und somit fehlerfrei für die Schaltung markiert. Die notwendigen Positionen der Jumper können Tabelle 5.4 entnommen werden, wobei gesteckte Jumper unbenutzte Eingänge darstellen.

Position	Funktion
1	Fehlereingang Safety (S) deaktiviert
2	Fehlereingang Gehäuse (G) deaktiviert
3	Fehlereingang Schirm (P) deaktiviert
4	Fehlereingang Fehler 4 deaktiviert
5	Fehlereingang Fehler 5 deaktiviert

Tabelle 5.4: Pin3 Fehlereingänge

Für Einstellarbeiten und Tests verfügt der Logikteil der Schaltung über eine Reihe von Pins, an denen die für den Teil der Schaltung relevanten Signale abgegriffen werden können. Tabelle 5.5 zeigt die Belegung von Pin3 - Synchronisation + Sicherheit. An Pin3 ist auch das Signal Start-Board verfügbar. Es gehört zwar nicht zur Sicherheitsschaltung, doch aufgrund dessen Funktion zur Synchronisation mit dem Board wurde es diesen Pins zugeordnet. Die Generierung und Bedeutung des Signals wurde bereits im Abschnitt 4.2.2 behandelt.

Position	Bezeichnung	Funktion
1	Start-Board	Startimpuls für Board von Timer 3 (5-V-Pegel, Start der Bilddarstellung)
2	Laser-On (L)	Lasermodulation von Timer 4 (5-V-Pegel)
3	Laser-Modulation (M)	Ausgang Lasermodulation (nach Sicherheitsschaltung)
4	Safety-Signal (S)	Fehler-Signal des Scannertreibers
5	Fehler-Signal (F)	Summensignal aller Fehlersignale (AND-Verknüpfung)
6	GND	Masse

Tabelle 5.5: Pin3 Synchronisation + Sicherheit





## 6 Software und Bildgenerierung mit LabVIEW

Sämtliche Entwicklungen für Software zur Bildgenerierung und Ansteuerung des Boards wurde mit LabVIEW durchgeführt. Die Kommunikation zwischen Aussteller und Computer wird über eine Firewire-Schnittstelle ausgeführt. Dadurch ist es möglich, mit nur einer Softwareanwendung den kompletten computerbasierten Teil der Steuerung des Ausstellers zu übernehmen. Diese Tatsachen erfüllen die an den Aussteller gestellten Forderungen in Bezug auf wenige Schnittstellen und einfache Bedienung.

### 6.1 Generierung der Bildinformationen

Um eine Projektion mit ansprechendem Inhalt zu schaffen, wird die aktuelle Uhrzeit dargestellt. Aufgabe des ersten Teilprogramms, welches mit LabVIEW erstellt wurde, ist die Generierung eines 24-bit-Arrays<sup>20</sup> der aktuellen Uhrzeit.

Ausgangspunkt dafür ist ein Zeichensatz. Dieser besteht aus einzelnen Bildern mit den Ziffern 0 bis 9 und einem Trennzeichen in Form eines Doppelpunktes. Mit einem solchen Zeichensatz lässt sich jede beliebige Uhrzeit im digitalen Format HH:MM:SS darstellen. Die Rohdaten dieser Zeichen liegen im Bitmap-Format mit einer Auflösung von 16 Pixeln in der Höhe und 10 Pixeln in der Breite vor. Die vertikale Auflösung ist durch die Anzahl der Boardkanäle bzw. der getrennt ansteuerbaren Makropixel des SLM vorgegeben worden. Die Auflösung in der anderen Dimension ist so angepasst worden, dass der benötigte Zeichensatz gut darstellbar ist (ähnlich einer 7-Segment-Anzeige).

Um eine Uhrzeit im Format HH:MM:SS anzuzeigen, werden inklusive der Trennzeichen insgesamt 8 Zeichen benötigt. Die Aufgabe des Programms besteht darin, aus der aktuellen Systemzeit des Steuercomputers ein stets aktuelles Array der Uhrzeit zu erstellen. Das Array besteht aus 16 Elementen  $\times$  80 Elementen (siehe Abb. 6.1). Die Darstellung des Arrays erfolgte in einem quadratischen Pixelraster.

Als erstes wird durch LabVIEW die aktuelle Uhrzeit des Computersystems ermittelt. Daraus wird im Weiteren das Array erstellt, in welchem die Uhrzeit codiert ist. Um entscheiden zu können, an welche Stelle des Bitmaps welche Ziffer geschrieben werden muss, wird die eingelesene Zeit in ihre einzelnen Stellen zerlegt, d.h. Ziffer für Ziffer isoliert. Dazu sind 8 Durchläufe in einer For-Schleife notwendig. Pro Durchlauf werden dabei entweder Stunden, Minuten oder Sekunden ausgewählt und daraus dann die jeweilige Ziffer der Zehner- oder Einerstelle berechnet. In den Durchgängen 3 und

<sup>20</sup> ähnlich einer Rastergrafik mit 24 Bit pro Element, d.h. 1 Byte pro Grundfarbe im RGB-System

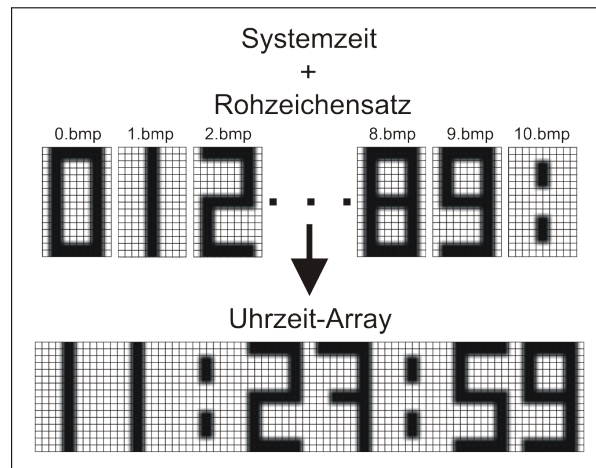


Abbildung 6.1: Erstellung des Uhrzeit-Arrays

6 werden diese Berechnungen jedoch nicht angestellt, sondern einfach die Zahl 10 weitergegeben. Die Zahl 10 dient später zur Auswahl des Trennzeichens. Eine genauere Übersicht der Schleife, deren Inhalt und den gesamten Programmablauf liefert das Struktogramm des Programms, welches in Abb. 6.2 gezeigt wird.

Die Zerlegung einer zweistelligen Zahl in die einzelnen Ziffern erfolgt über eine Ganzzahldivision mit Rest. Wird dazu die Zahl 10 als Divisor benutzt, ergibt sich als Ganzzahlanteil die Zehnerstelle und als Rest die Einerstelle des Dividenden.

Die berechneten Zahlen dienen im Folgenden zur Auswahl des richtigen Rohzeichens. Der Zeichensatz ist in Form von Bitmaps hinterlegt. Die Dateibezeichnung entspricht der enthaltenen Ziffer. Zum Beispiel ist *9.bmp* das Rohzeichen für eine „9“. Die Datei *10.bmp* stellt das Trennzeichen dar, deshalb auch die Übergabe der 10 in 2 Durchgängen der Schleife im Programmablauf. Die Bitmaps des Zeichensatzes können mit jedem Bildbearbeitungsprogramm geöffnet und nach Wünschen editiert werden. Wichtig dabei ist nur, dass immer die Größe von 16 Pixeln  $\times$  10 Pixeln erhalten bleibt.

Nach Berechnung der Ziffer und dem Einlesen des dazugehörigen Rohzeichens, wird dieses an die festgelegte Stelle des am Anfang initialisierten Uhrzeit-Arrays geschrieben. Von Stelle zu Stelle der Uhrzeit unterscheidet sich die Einfügeposition horizontal jeweils um 10 Elemente, was gerade einer Zeichenbreite entspricht. So können die Stellen nahtlos aneinandergereiht werden und es entsteht das geforderte Array mit 16 Elementen  $\times$  80 Elementen. Es handelt sich bei den Rohzeichen-Bitmaps um Schwarz-Weiß-Darstellungen und bei den Arrays um die entsprechenden RGB-codierten Werte. D.h. es gibt nur zwei unterschiedliche Werte, die angenommen werden können. Tabelle 6.1 ordnet die möglichen Werte den Auslenkspannungen  $U_A$  der Spiegel und dem Ergebnis in der Projektion zu.

Abb. 6.3 zeigt einen Screenshot des Blockdiagramms des Programms in LabVIEW.

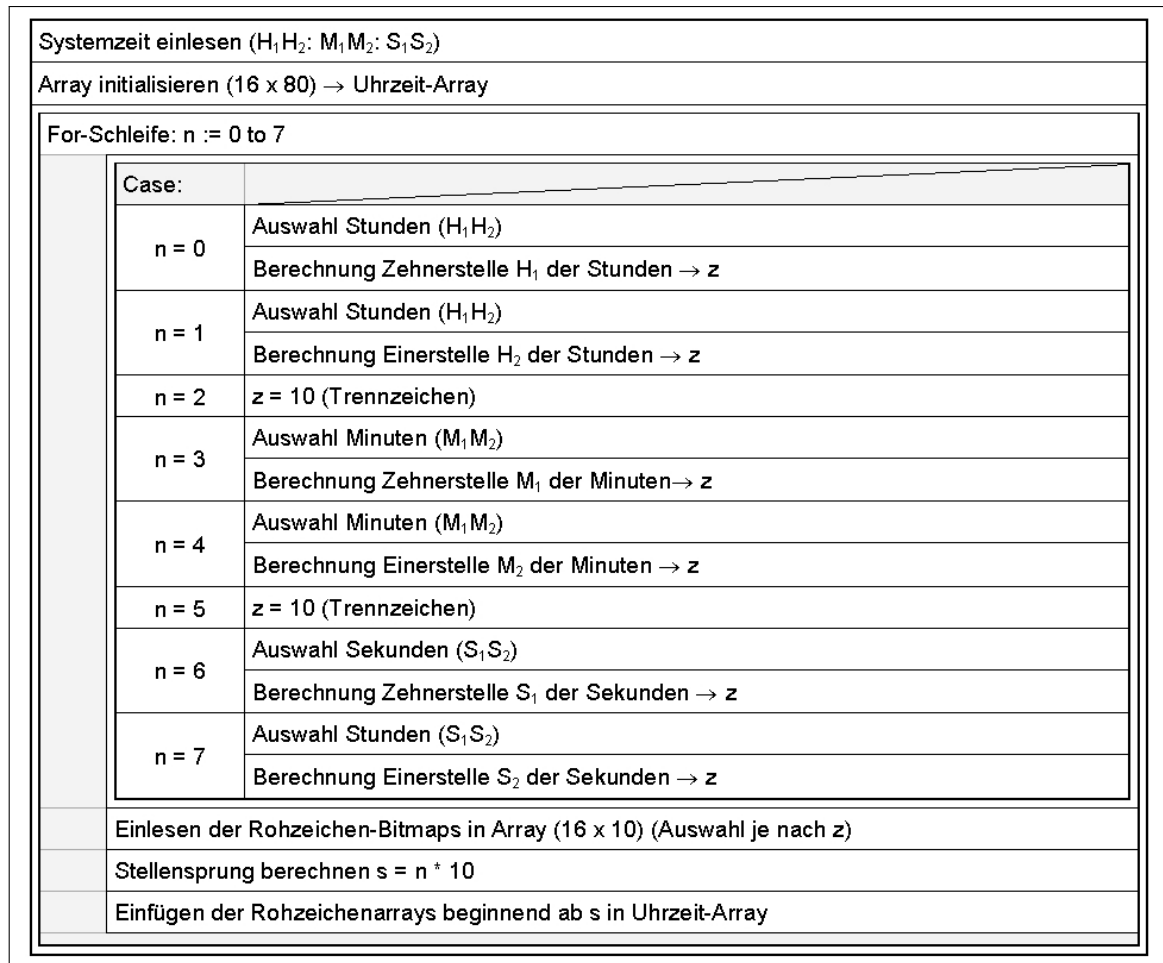


Abbildung 6.2: Struktogramm zur Erstellung des Uhrzeit-Arrays

Farbe	Wert		Auslenk-Spannung $U_A$	Spiegel-Auslenkung	Projektion
	binär	hexadezimal			
Schwarz	0	0x000000	0 V	unausgelenkt	hell
Weiß	16.777.214	0xFFFF	20 V	ausgelenkt	dunkel

Tabelle 6.1: Zuordnung der Arraywerte zur Intensität in der Projektion

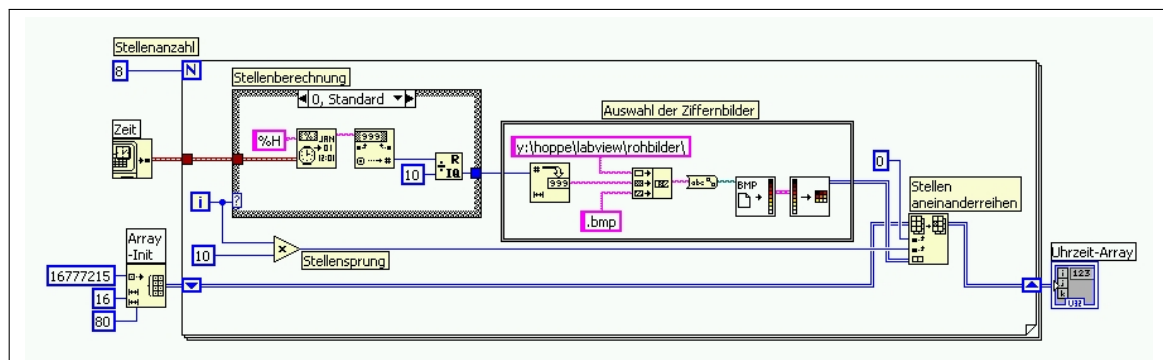


Abbildung 6.3: Screenshot des LabVIEW-Programms zur Uhrzeitgenerierung

## 6.2 Umsortierung der Bildinformationen nach der Codierung für das Steuerungsboard

Ein Array, wie es das erste LabVIEW-Teilprogramm erstellt, kann noch nicht dazu genutzt werden, die Daten für das Steuerungsboard zu liefern. Das Board, welches die Spannungen für die Adressierung der Einzelspiegel liefert, erwartet als Input ein Array mit 256 Elementen  $\times$  256 Elementen. Die 65.535 Werte werden nach einer bestimmten Codierung für die Ansteuerung der Spiegel genutzt. Das Board besitzt 16 Datenkanäle, auf die diese 65.535 Werte nach einem festgelegten zeitlichen Abfolge übertragen werden. Auch hier steht der Wert „0“ für schwarz, was zu keiner Auslenkung der Spiegel führt und der Wert „16.777.215“ für weiß, was einer maximalen Spannung und damit einer Maximalauslenkung der Spiegel entspricht. Das Board setzt die digitalen Farbinformationen des Arrays in analoge Spannungen um und sendet diese über die 16 Datenleitungen an die Elektroden der entsprechenden Makropixel des SLM-Bauelements, um die Spiegel auszulenken. Im Nachfolgenden soll die angewendete Codierung und der Aufbau des Input-Arrays anhand von Abb. 6.4 erklärt werden.

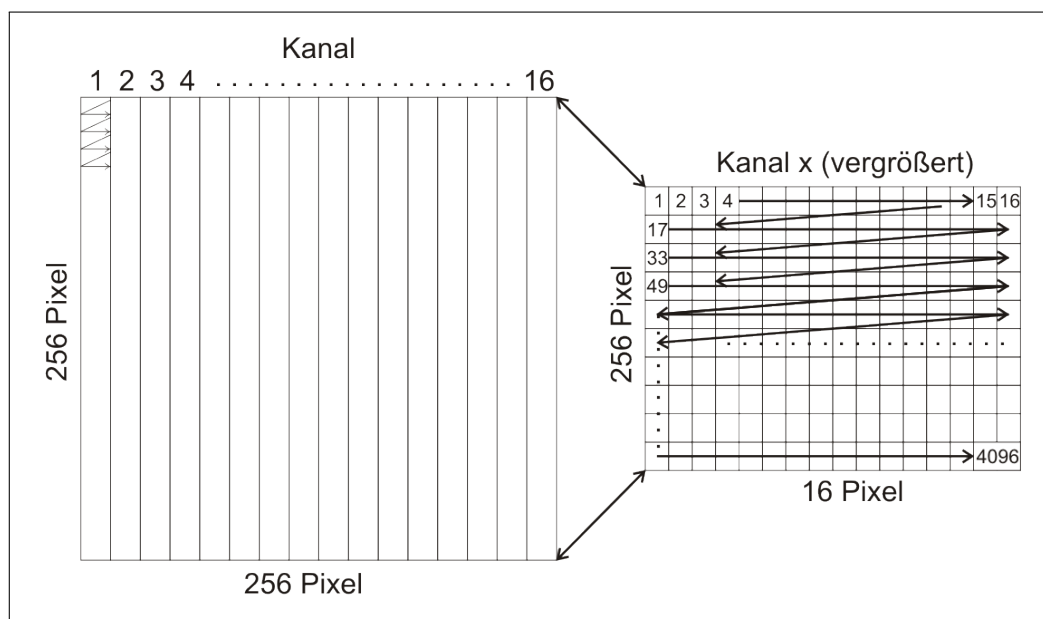


Abbildung 6.4: Schema der Codierung des Arrays für das Steuerungsboard

In der Grafik ist links das Input-Array aus 256 Elementen  $\times$  256 Elementen gezeigt. Dieses Array wird in 16 vertikale Streifen mit je 16 Elementen Breite unterteilt. Jeweils ein solcher Streifen mit insgesamt  $16 \cdot 256 = 4.096$  Werten steuert den zeitlichen Verlauf der Spannung auf einem Kanal des Boards und somit sowohl die Spiegelauslenkung des Makropixels als auch das Ergebnis in der Projektion. Es soll nunmehr eine solcher Streifen, wie auf der rechten Seite der Abbildung vereinfacht dargestellt, betrachtet werden. Das Board liest die Werte der Elemente wie durch die Pfeile markiert zeilenweise aus und generiert die dazugehörigen Spannungen auf dem Kanal. Es wird alle  $100\text{ ns}$  das nächste Element benutzt, die darauf skalierte Spannung erzeugt und über einen Kanal

des Boards an das entsprechende Makropixel des SLM-Bauelements weitergeleitet. Die Angabe der Zeit  $t = 100 \text{ ns}$  gilt nur für den Betrieb des Boards mit Onboard-Takt. Wird wie im Falle des Ausstellers das Board von außen langsamer getaktet, verhält sich die Zeit  $t$  proportional zum Boardtakt. Dabei ist der eigentliche Boardtakt ein Viertel des von außen angelegten Taktsignals. Die Anpassung der Geschwindigkeit des Boards erfolgt mit dem Taktgenerator (Abschnitt „4.2.3 Taktgenerator“). Es lassen sich mit einem Array, welches an das Board gesendet wird, 4096 zeitlich aufeinanderfolgende, verschiedene Auslenkungen der 16 Makropixel realisieren.

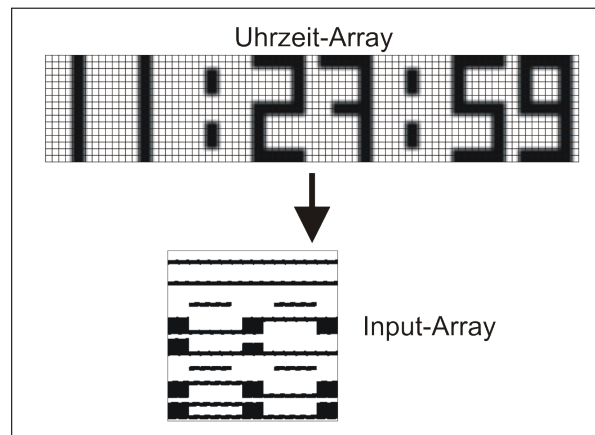


Abbildung 6.5: Umsortierung des Arrays

Es musste ein Programm mit LabVIEW geschaffen werden, welches die Informationen der Uhrzeit genau so umsortiert, dass es den Codierungsstandard des Boards entspricht (siehe Abb. 6.5). Der prinzipielle Ablauf dazu ist in einem Struktogramm in Abb. 6.6 erfasst worden. Nachdem das Array, welches umsortiert werden soll, eingelesen ist, wird die Anzahl der Spalten  $n_s$  und Zeilen  $n_z$  bestimmt. Die Anzahl der Zeilen bleibt zwar aufgrund der 16 Boardkanäle immer bei 16, doch um die Arbeitsweise des Programms nachvollziehbar zu gestalten, wird sie trotzdem bestimmt. Danach wird, um die Grundlage für das Input-Array zu schaffen, ein Array mit den vom Board geforderten  $256 \text{ Elementen} \times 256 \text{ Elementen}$  initialisiert und zwar mit allen Werten gleich „16.777.215“ für weiß, was später den Hintergrund des gescannten Bildes darstellt. Es gibt einen Unterschied zwischen den durch das Input-Array auflösbaren und den im Uhrzeit-Array codierten Zeitinformationen. Das Input-Array verfügt nur über so viele Zeitinformationen, wie es Spalten hat. Das sind im einfachsten Fall 80. Im Array für das Board können bzw. müssen aber 4.096 Informationen hinterlegt werden. Es wäre möglich, ein Bild mit einer Auflösung von 16 Pixeln in der Höhe und 4.096 Pixeln in der Breite zu projizieren. Abgesehen von dem außerordentlich übertriebenen Seitenverhältnis, würde bei einer Scanbreite von beispielsweise 300 mm ein Pixel nur eine Breite von 0,07 mm haben, was auf der einen Seite bei einem Scan mit dem Auge kaum mehr auflösbar wäre und bei einer Pixelhöhe von ca. 2,5 mm auch keinen Sinn macht.

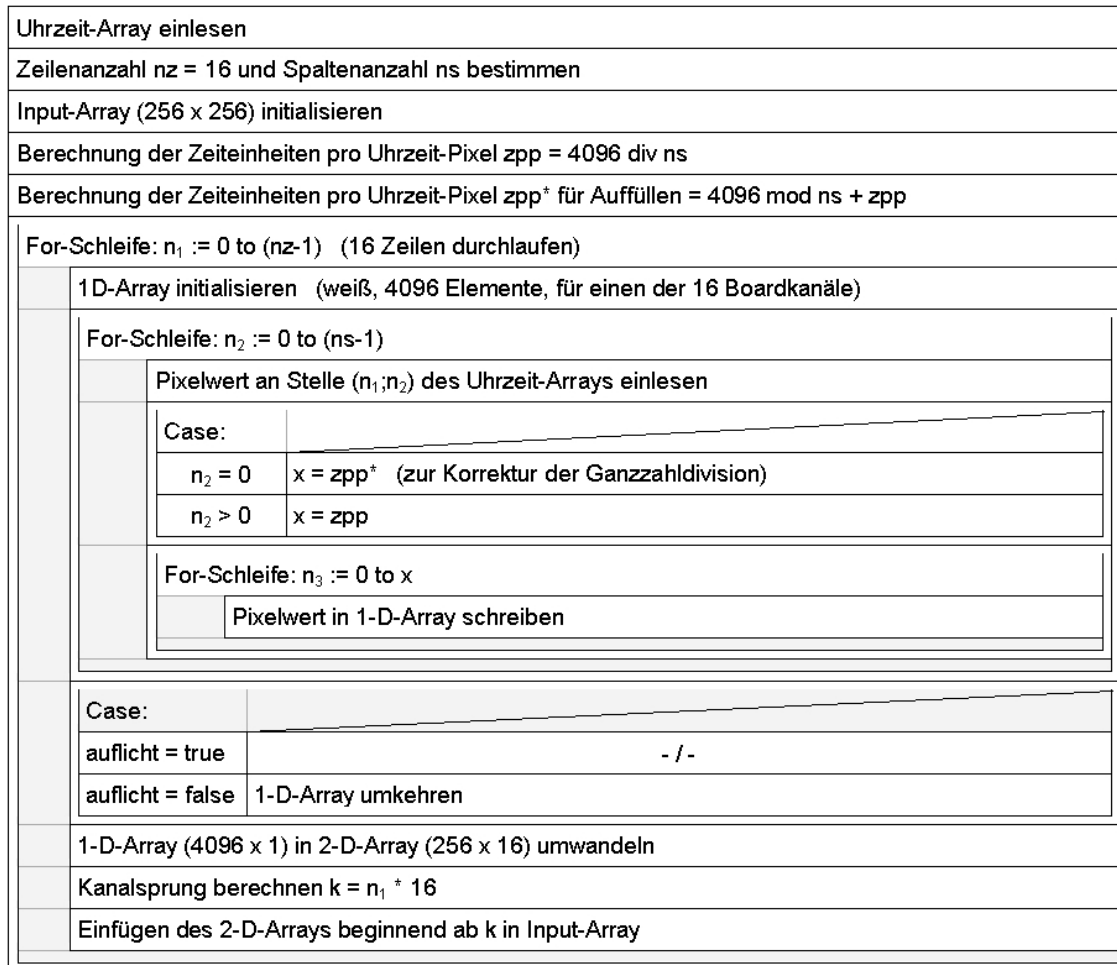


Abbildung 6.6: Struktogramm zur Umsortierung eines Uhrzeit-Arrays nach der Board-Codierung

Um die 4.096 Zeitschritte mit den Informationen des Uhrzeit-Arrays zu füllen, wird einfach ein Wert dieses Arrays mehrmals in das Input-Array für das Board geschrieben. Das geschieht nahezu gleichverteilt und nach folgender Berechnung der Zeiteinheiten pro Input-Pixel  $zpp$ .

$$zpp = 4096 \text{ div } ns \quad (6.1)$$

$$zpp* = 4096 \text{ mod } ns + zpp \quad (6.2)$$

Ein Wert des Uhrzeit-Arrays wird  $zpp$ -mal in das Input-Array geschrieben. Durch die Ganzzahldivision bzw. das Runden bei der Berechnung von  $zpp$  würde es dazu kommen, dass nicht alle der 4.096 Informationen beschrieben werden. Um dies auszugleichen, wird ein einmaliges Auffüllen benötigt. Es wird ein Pixel des Uhrzeit-Arrays öfter als normal im Input-Array wiederholt,  $zpp*$ -mal. Das Umsortieren wird realisiert, indem das Uhrzeit-Array zeilenweise ausgelesen wird und jeweils eine Zeile in einen der 16 beschriebenen Streifen für einen Boardkanal codiert wird. Ein Pixel wird ausgelesen und  $zpp$ -mal in ein vorher initialisiertes 1-D-Array geschrieben. Beim ersten Pixel wird das Auffüllen auf die 4.096 Informationen vorbereitet, das Pixel  $zpp*$ -mal wiederholt. Ein solches 1-D-Array spiegelt genau das zeitliche Verhalten der Spannung auf einem der 16 Boardkanäle bzw. der Auslenkung eines der 16 Makropixels wider.

Die Art der Projektion des Ausstellers, in Auflicht oder Durchlicht, sollte variabel gehalten werden. Um dies im Programm umzusetzen, muss das erzeugte 1-D-Array komplett umgekehrt werden. Die codierten Informationen werden dann in umgekehrter Reihenfolge projiziert. Das LabVIEW-Programm bietet eine einfache Umschaltung zwischen Auflicht- bzw. Durchlichtprojektion. Die 4.096 Informationen pro Kanal müssen jedoch noch an das 256er-Format für das Board angepasst werden. Dazu wird das 1-D-Array in ein 2-D-Array mit 256 Elementen  $\times$  16 Elementen umgewandelt. Diese Struktur entspricht dann einem Streifen des Matrix-Arrays, wie er in Abb. 6.4 auf der rechten Seite abgebildet ist. Für jede Zeile des Uhrzeit-Arrays wird nacheinander solch ein Unterarray generiert und nebeneinander mit einem Versatz von jeweils 16 Elementen in das am Anfang initialisierte Matrix-Array eingefügt.

Mit diesem zweiten Teilprogramm in LabVIEW (siehe Screenshot in Abb. 6.7) kann jedes beliebige Uhrzeit-Array mit einer festgeschriebenen Höhe von 16 Elementen und variabler Breite so umsortiert werden, dass es vom Steuerungsboard verarbeitet und vom SLM-Bauelement dargestellt werden kann.

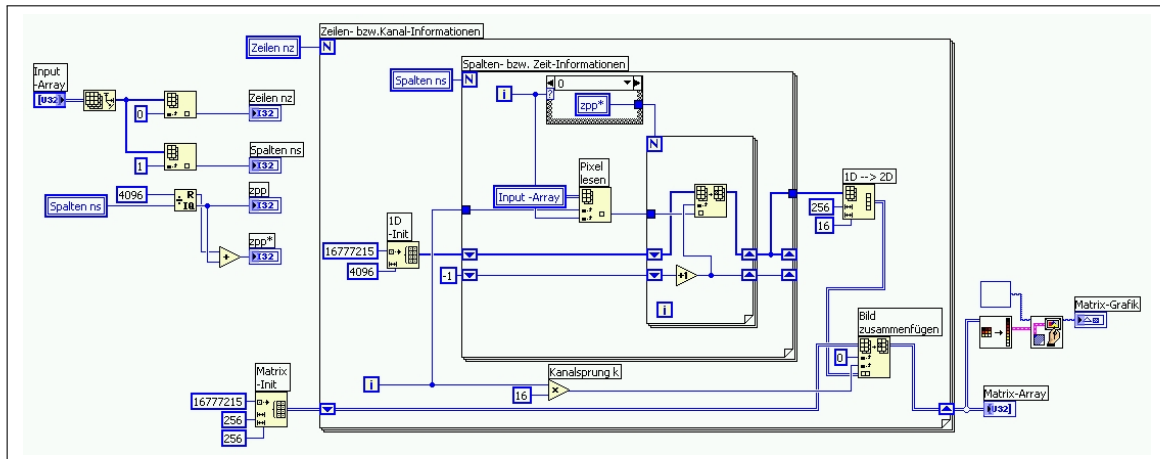


Abbildung 6.7: Screenshot des LabVIEW-Programms zur Umsortierung der Uhrzeit

### 6.3 Ansteuerung des Boards

Nach der Aufbereitung der Uhrzeitinformationen und der Codierung für das Board werden diese an das Board übertragen. Dadurch wird dafür gesorgt, dass das Board die Uhrzeitinformationen mit Hilfe des SLM darstellt. Die Steuerung des Boards ist DLL<sup>21</sup>-basiert. LabVIEW bietet die Möglichkeit, Befehle einer DLL in einzelne VIs<sup>22</sup> zu integrieren.

Der Ablauf der Steuerung des Boards ist in Abb. 6.8 dargestellt. Es handelt sich prinzipiell immer um dieselbe Ausführung von Befehlen. Um eine Uhrzeit mit laufenden Sekunden in Echtzeit darzustellen, ist es notwendig, mindestens einmal pro Sekunde ein neues Input-Array an das Board zu senden. Vor dem Senden der Daten wird das Input-Array anhand der aktuellen Systemzeit mit den im Voraus beschriebenen LabVIEW-Teilprogrammen generiert. Wie bereits erläutert, beinhaltet ein Input-Array immer die Informationen um ein vollständiges Uhrzeitbild zu projizieren. Dieses Input-Array wird eine Sekunde wiederholt dargestellt und dann das nächste Array nachgeladen, um die Uhrzeit zu aktualisieren. Im Falle der Ansteuerung mit LabVIEW geschieht dies in einer Schleife.

Die Generierung der Board-kompatiblen Uhrzeitinformationen und das zyklische Nachladen dieser, sowie die komplette Steuerung des Boards erfolgt in einem Programm. Der Benutzer verfügt dazu über eine einfache Bedienoberfläche (Abb. 6.9). Darin sind das Starten und Stoppen der Projektion, die Auswahl der Projektionsart (Auflicht oder Durchlicht), eine Fehleranzeige für das Board und verschiedene Einstellungen untergebracht.

Im Standardfall einer regulären Inbetriebnahme des Ausstellers muss der Bediener nichts Weiteres tun als den Button zum Starten der Applikation unter der Menüleiste

<sup>21</sup> DLL = Dynamik Link Library; dynamische Bibliothek von Programmcode

<sup>22</sup> VI = Virtuelle Instrumente; Unterprogramme in LabVIEW



Firewire-Schnittstelle initialisieren	
Board starten	
INI-Datei für Board laden	
Solange Bilder dargestellt werden sollen:	
	Generierung des Matrixdaten mit beschriebenen LabVIEW-Teilprogrammen
	Datenübertragung
	Matrix starten
	Bilddarstellung für Zeitraum t
	Matrix stoppen
Board stoppen	
Firewire-Schnittstelle schließen	

Abbildung 6.8: Ablauf der Steuerung des Boards

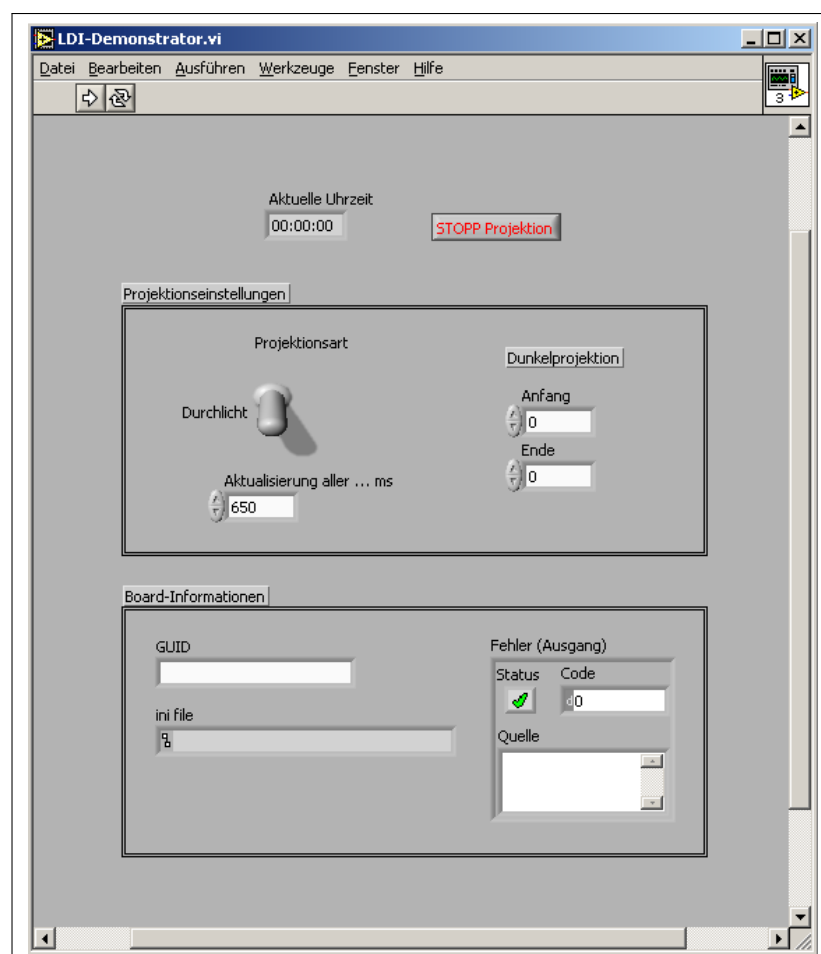


Abbildung 6.9: LabVIEW-Oberfläche zur Steuerung des Ausstellers

anzuklicken. Die einzige notwendige Einstellung ist die Wahl der Projektionsart. Alle anderen Bedienelemente dienen zu grundlegenden Einstellungen der Projektion, welche im Normalfall nicht notwendig sind. Eine ausführlichere Dokumentation der Bedienung der Software ist in der Anleitung des Ausstellers zu finden.

## 7 Gehäuse

In diesem Kapitel soll der Entwurf für das Gehäuse des Messeausstellers beschrieben werden. Der Entwurf des Gehäuses unterliegt im Wesentlichen folgenden Gesichtspunkten.

- Kompakte Bauweise
- Stabilität
- Einfache Justage
- Lasersicherheit
- Optisches Design

Um eine kompakte Bauweise zu gewährleisten, werden sämtliche Komponenten in einem 4-lagigen Aufbau angeordnet. Dies bietet eine starke Platzersparnis im Gegensatz zur Anordnung aller Komponenten in einer Ebene nebeneinander. Die vier Ebenen (Abb. 7.1) sind in folgender Weise strukturiert, wobei die Nummerierung von oben nach unten erfolgt:

**Ebene 4** Spannungsversorgung (zwei Netzteile), Scannertreiber, Steuerungselektronik

**Ebene 3** Steuerungsboard

**Ebene 2** Optischer Aufbau; inklusive Laser, SLM und Galvoscanter

**Ebene 1** Umlenkspiegel und Projektionsschirm

Für alle Komponenten müssen Versorgungsspannungen bereitgestellt werden. Der Aussteller verfügt dazu über einen 230-V-AC-Netzspannungsanschluss durch eine Kaltgerätebuchse inklusive Schalter. Aus der Netzspannung werden mit 2 Schaltnetzteilen die notwendigen Spannungen von  $\pm 24\text{ V}$ ,  $\pm 12\text{ V}$  und  $+ 5\text{ V}$  erzeugt. Neben diesen Spannungen müssen auch alle Signale, welche zur Steuerung und Versorgung des Ausstellers dienen, im Gehäuse verteilt werden. Abb. 7.2 zeigt für sämtliche Signale einen Signallaufplan.

Die einzigen Schnittstellen des Ausstellers nach außen sind der Netzanschluss und die Firewire-Verbindung zum Laptop oder Computer. Alle anderen Signale und Komponenten befinden sich im Gehäuse (blauer Rahmen). Die Verteilung der Signale muss auch ebenenübergreifend geschehen (orange Signalfade). Dazu sind im Gehäuse geeignete Kabeldurchführungen vorgesehen.

Der Aussteller ist durch die Beschaffenheit des Gehäuses komplett abgeschlossen. Die einzige Öffnung ist eine Strahlaustrittsöffnung auf der Oberseite. Durch diese Öffnung dringt das gescannte Bild nach oben und wird mit einem verstellbaren Spiegel auf den Schirm projiziert. Dieser Umlenkspiegel und der Schirm sind die einzigen Komponenten,

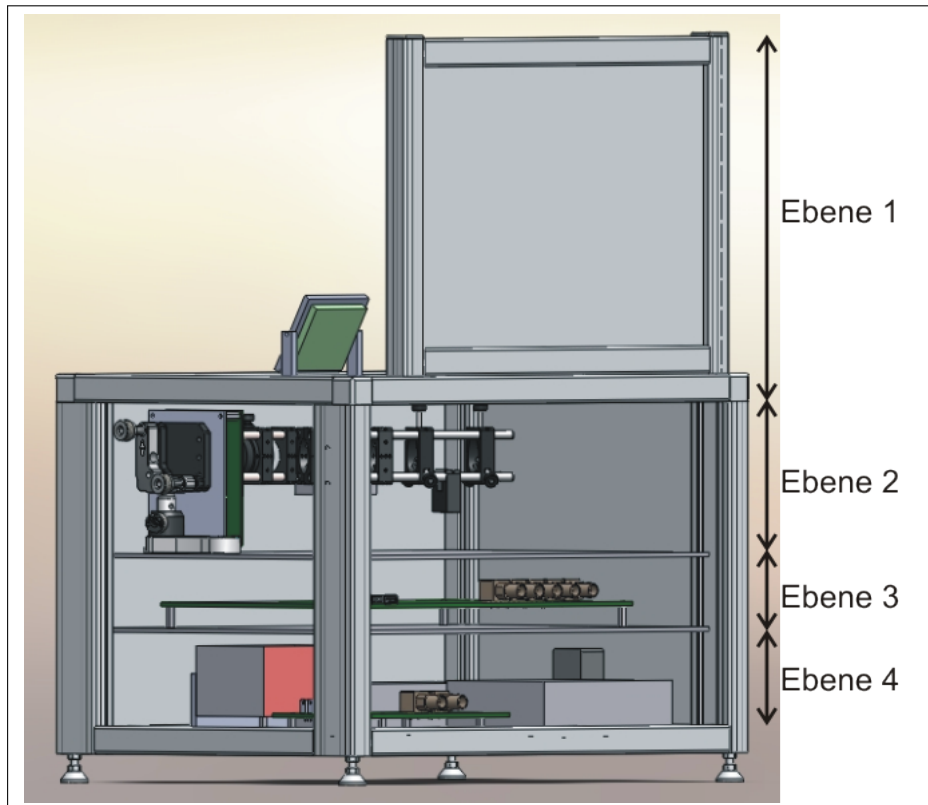


Abbildung 7.1: Ebenenaufbau des Ausstellers

die auf dem Aussteller sitzen (Ebene 1) und somit für den Betrachter sichtbar sind. Der restliche optische Aufbau befindet sich in Ebene 2. Durch die Einhausung des Optikaufbaus kann die Lasersicherheit des Gerätes gewährleistet werden. Sowohl der Rohstrahl des Lasers, alle Foki und andere Stellen, die Gefahrenpotenzial in sich tragen, sind im Gehäuse gekapselt. Sobald der Strahl aus dem Gehäuse austritt, besteht keine Gefahr mehr für den Betrachter. Eventuelle Fehlfunktionen werden durch die Sicherheitsschaltung abgedeckt.

Neben dem Aspekt der Lasersicherheit dient die komplette Einhausung der Komponenten auch dem optischen Gesamteindruck des Ausstellers. Das Gehäuse besteht im Wesentlichen aus einer Konstruktion mit Profilschienen und einer Verplankung mit Aluminiumblechen (siehe Abb. 7.3).

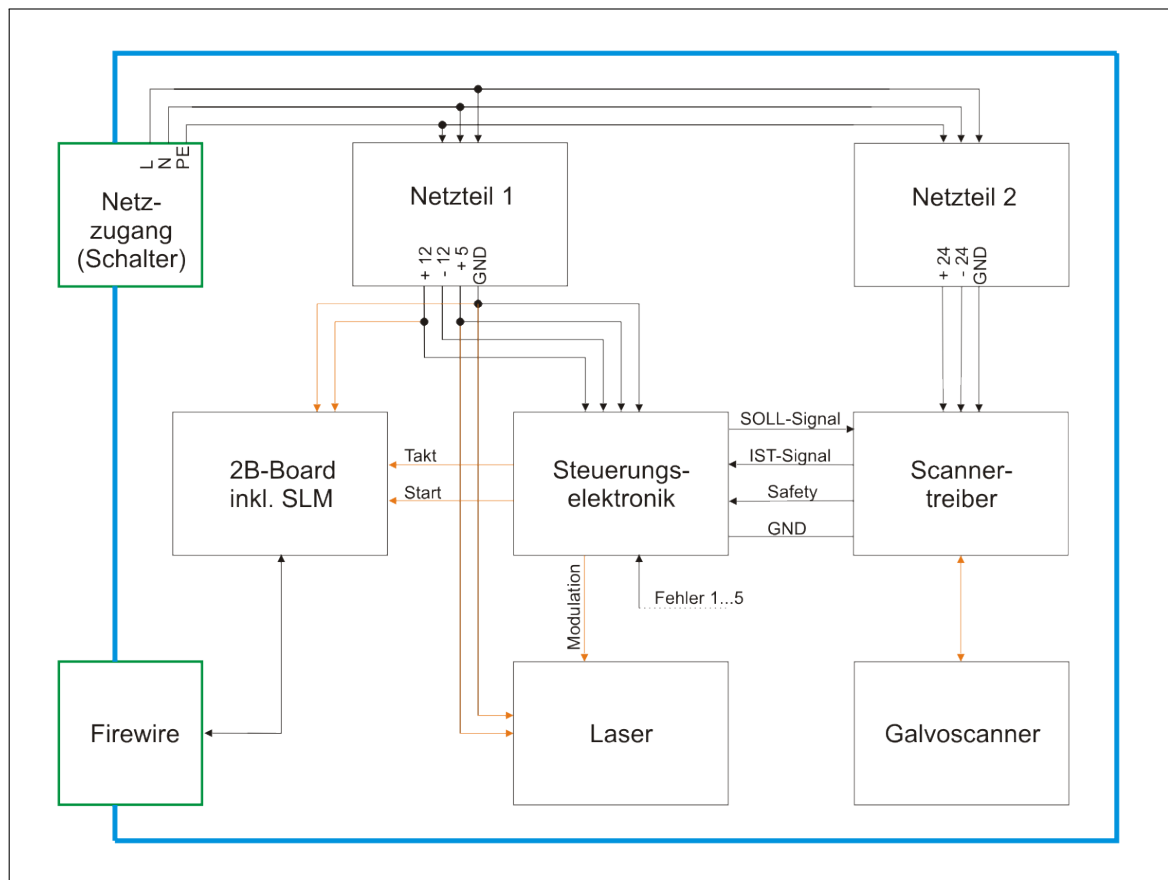


Abbildung 7.2: Signallaufplan des Ausstellers

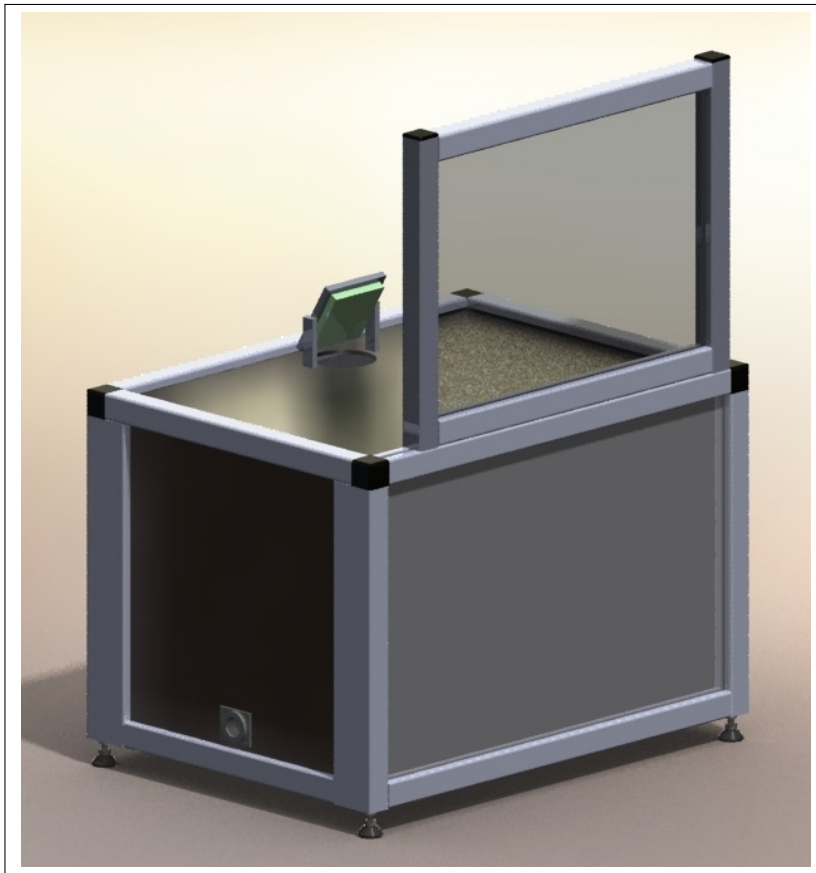


Abbildung 7.3: Gehäusedesign des Messeausstellers

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Projektes war es, einen Messeaussteller für Lichtmodulatoren zu entwickeln und aufzubauen. Zur Umsetzung diente ein neuentwickeltes SLM-Bauelement des Fraunhofer IPMS. Um mit diesem Lichtmodulator ein flächiges Bild zu projizieren, musste ein optischer Aufbau, eine Steuerungselektronik und -software sowie die entsprechende Mechanik dazu entworfen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass das Prinzip der Propelleruhr auf einen SLM anwendbar ist. Es ist möglich, mit Hilfe eines SLM durch den Scan seiner streifenförmigen Abbildung ein flächiges Bild zu projizieren. Das angestrebte Funktionsprinzip konnte erfolgreich umgesetzt werden. Der Aussteller verfügt über einen minimalen Umfang von optischen Elementen. Dies macht den Aufbau leicht verständlich, und der notwendige Justageaufwand beläuft sich auf wenige Schritte. Die zur Steuerung entworfene Elektronik ermöglicht die Einstellung aller wesentlichen Parameter und ist im Umfang trotzdem überschaubar. Die einzige Schnittstelle des Bedieners zum Aussteller bildet die Software zur Bildgenerierung und Kontrolle des Steuerboards. Durch die geschaffene Software kann mit dem Aussteller die aktuelle Uhrzeit projiziert werden. Die Projektion an sich ist optimiert auf Tageslichtfähigkeit, Flimmerfreiheit und möglichst hohen Kontrast. Zum derzeitigen Stand der Entwicklung des Ausstellers ist es möglich, ein ansprechendes Bild (Abb. 8.1) der aktuellen Uhrzeit zu projizieren.

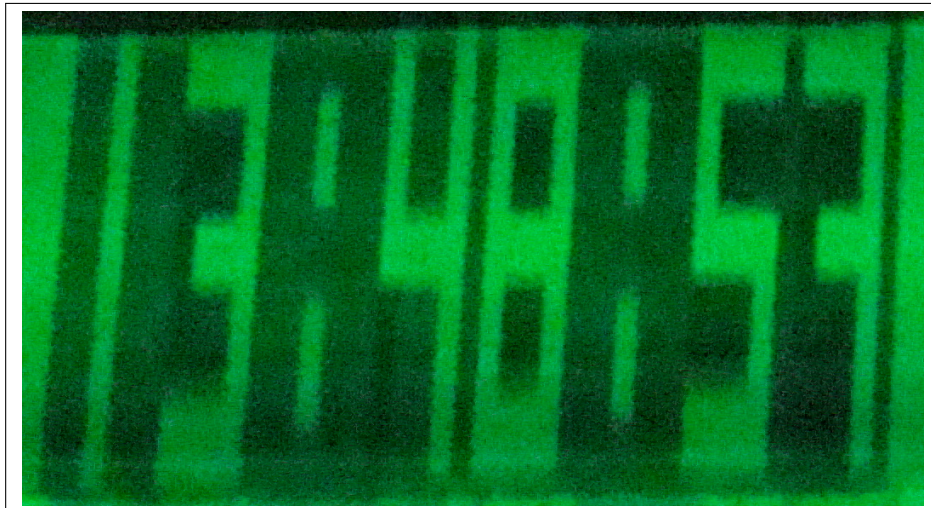


Abbildung 8.1: Projektion einer Uhrzeit

Mit der Tatsache, dass ein Bild der Uhrzeit mit dem beschriebenen Aufbau und dem verwendeten SLM-Bauelement projiziert werden kann, ist die Funktionsfähigkeit des Ausstellers nachgewiesen. Zum derzeitigen Stand steht vom Prinzip her nur noch die Integration des gesamten Aufbaus in das entworfene Gehäuse aus. Trotzdem sollen im

Nachgang an die Arbeit noch einige Dinge angepasst und verbessert werden, um das Ergebnis noch zu steigern. Darunter zählen folgende Punkte:

1. höhere vertikale Auflösung
2. Verwendung eines anderen Steuerungsboards
3. Anpassung der Software für Laufschrift und Animationen

Die genannten Arbeitspunkte dienen alle zusammen nur der Optimierung des Bildinhaltes. Am Prinzip der Projektion wird sich grundlegend dadurch nichts ändern.



# Literaturverzeichnis

- [1] **Crandall, C. M.:**  
Spatial light modulator technology overview: Current concepts and commercially available devices. Proc. SPIE, Vol. 2566 (1995)
- [2] **Dauderstädt, U.:**  
Grundlagen der Mikrospiegelarrays des Fraunhofer IPMS.  
Interner Bericht Fraunhofer IPMS, Dresden (2004)
- [3] **Gehner, A.:**  
Entwicklung hochauflösender Flächenlichtmodulatoren mit deformierbaren Spiegelanordnungen für die maskenlose Mikrolithografie. Shaker Verlag, Aachen (1997)
- [4] **Hecht, E.:**  
Optik. 4. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München (2005)
- [5] **Hornbeck, Larry J.:**  
Digital Light Processing and MEMS: reflecting the digital display needs of the networked society. Proc. SPIE, Vol. 2783 (1996)
- [6] **Kück, H.; Bollerott, M.; Doleschal, W.; Gehner, A.; Grundke, W.; Kunze, D.; Melcher, R.; Paufler, J.; Seltmann, R.; Zimmer, G.:**  
New system for fast submicron laser direct writing. Proc. SPIE, Vol. 2440  
Optical/Laser Microlithography VIII (1995)
- [7] **Menzel, E.; Mirande, W.; Weingärtner, I.:**  
Fourier-Optik und Holographie. Springer Verlag, Wien (1973)
- [8] **Pedrotti, F.; Pedrotti, L.; Bausch W.; Schmidt H.:**  
Optik für Ingenieure - Grundlagen. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin (2001)
- [9] **Schnabel P.:**  
Elektronik-Fibel. 4. Auflage, Books on Demand, Ludwigsburg (2007)
- [10] **Bedienungsanleitung Litrack Scanner:**  
Firma Müller Elektronik; <http://www.jmlaser.com>
- [11] **Datenblatt Fairchild Timer NE555:**  
URL: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/NE555.pdf>  
(verfügbar am 28.05.2010)

**[12] Datenblatt Maxim MAX038:**

URL: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX038.pdf>

(verfügbar am 04.06.2010)

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, 01. Oktober 2010